



R U S S I A N T E C H N O L O G I C A L J O U R N A L

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и наноэлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств. Управление в организационных системах*

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
 - Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
 - Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
 - Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
 - Аналитическое приборостроение и технологии
 - Математическое моделирование
 - Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах
 - Управление качеством продукции. Стандартизация
 - Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
 - Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and nondestructive testing
 - Modern radio engineering and telecommunication systems
 - Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
 - Analytical instrument engineering and technology
 - Mathematical modeling
 - Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems
 - Product quality management. Standardization
 - Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2026, том 14, № 2

Russian Technological Journal
2026, Vol. 14, No. 2

Russian Technological Journal 2026, том 14, № 2

Дата опубликования 31 марта 2026 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Периодичность: 6 раз в год.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 г. издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026), а с января 2016 г. по июль 2021 г. под названием «Российский технологический журнал» (ISSN 2500-316X).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» 119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, входит в RSCI, РГБ, РИНЦ, eLibrary, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией	к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор	д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор	А.С. Алексеенко
Технический редактор	Д.В. Трофимова

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Р-108.
Тел.: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733 от 19.08.2021 г. СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

<https://www.rtlj-mirea.ru>

Russian Technological Journal 2026, Vol. 14, No. 2

Publication date March 31, 2026.

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Periodicity: six times a year.

The journal was founded in December 2013. The titles were «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026) and «Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal» from January 2016 until July 2021 (ISSN 2500-316X).

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education
«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation. The Journal is included in Russian Science Citation Index (RSCI), Russian State Library (RSL), Science Index, eLibrary, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, President of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Editorial staff:

Managing Editor	Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor	Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor	Anna S. Alekseenko
Technical Editor	Darya V. Trofimova

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

The registration number ПИ № ФС 77 - 81733 was issued in August 19, 2021 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media of Russia.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

Редакционная коллегия

- Кудж
Станислав Алексеевич** д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Банис
Юрас Йонович** хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Бетелин
Владимир Борисович** академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Боков
Алексей Алексеевич** д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Вахрушев
Сергей Борисович** д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Гуляев
Юрий Васильевич** академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Жуков
Дмитрий Олегович** д.т.н., профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Кимель
Алексей Вольдемарович** к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Крамаров
Сергей Олегович** д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Новиков
Дмитрий Александрович** академик РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>, novikov@ipu.ru
- Перно Филипп** Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Романов
Михаил Петрович** д.т.н., профессор, научный руководитель Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Савиных
Виктор Петрович** академик РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Соболевский
Андрей Николаевич** д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, <http://orcid.org/0000-0002-3082-5113>, sobolevski@iitp.ru
- Сюй
Ли Да** академик Европейской академии наук, Российской инженерной академии и Инженерной академии Армении, Dr. Sci. (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, <https://orcid.org/0000-0002-5954-5115>, lxu@odu.edu
- Харин
Юрий Семенович** академик Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Чаплыгин
Юрий Александрович** академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
- Шпак
Василий Викторович** к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

- Stanislav A. Kudzh** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Juras Banys** Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Vladimir B. Betelin** Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
- Alexei A. Bokov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Sergey B. Vakhrushev** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Yury V. Gulyaev** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academic Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Dmitry O. Zhukov** Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Alexey V. Kimel** PhD (Phys.-Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Sergey O. Kramarov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Dmitry A. Novikov** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>, novikov@ipu.ru
- Philippe Pernod** Dr. Sci. (Electronics), Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Mikhail P. Romanov** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Supervisor of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Viktor P. Savinykh** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Andrei N. Sobolevski** Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, <http://orcid.org/0000-0002-3082-5113>, sobolevski@iitp.ru
- Li Da Xu** Academician at the European Academy of Sciences, Russian Academy of Engineering (formerly, USSR Academy of Engineering), and Armenian Academy of Engineering, Dr. Sci. (Systems Science), Professor and Eminent Scholar in Information Technology and Decision Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, the United States of America. Scopus Author ID 13408889400, <https://orcid.org/0000-0002-5954-5115>, lxu@odu.edu
- Yury S. Kharin** Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Yuri A. Chaplygin** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
- Vasily V. Shpak** Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *М.А. Анфёров*
Кластеризация многомерных временных данных в рамках информационной поддержки принимаемых управленческих решений
- 17** *Д.С. Беляков*
Архитектура распределенной системы тестирования устройств интернета вещей на этапе их разработки
- 29** *А.С. Зуев, П.Н. Советов, И.Е. Тарасов*
О проектировании гетерогенных вычислительных систем с аппаратным ускорением массово-параллельной потоковой обработки данных
- 42** *Е.А. Халтурин, А.А. Кытманов, Ю.В. Вайнштейн, Т.В. Зыкова*
Программные методы обработки, анализа и визуализации учебных планов

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 57** *К.В. Латышев, М.С. Костин, К.А. Бойков*
Формирование радиовизионных сигналов спектральной насыщенностью в режиме переходных искажений интегральных сверхвысокочастотных усилителей для систем распознавания жестов

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

- 69** *А.А. Егоренков, И.В. Данилова, М.И. Бибинова, С.Н. Чельщиков, А.Н. Вязников, К.С. Баталов*
Поиск технологических решений, направленных на снижение количества дефектов изображения в гибридном приборе ближнего инфракрасного диапазона
- 80** *Е.Ф. Певцов, Т.А. Деменкова, Ю.А. Коротаев, А.С. Сигов*
Физически неклонированные функции в цифровых интегральных схемах
- 103** *Н.Э. Шерстюк, К.А. Брехов, Е.Д. Мишина*
Моделирование резонансного возбуждения терагерцевым излучением решеточной подсистемы сегнетоэлектрика в условиях неравновесного состояния

Математическое моделирование

- 113** *И.Г. Лебо, В.А. Комарова, М.А. Рыжков*
Влияние неоднородностей поршня и облучения на формирование гиперзвуковой ударной волны в лазерной ударной трубе
- 124** *А.С. Леонтьев, Д.В. Жматов*
Анализ производительности и временных характеристик промышленных сетей со случайным и детерминированным эквидистантным распределением узлов

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 134** *С.А. Кудж, Н.Б. Голованова, Ю.Г. Графов*
Формирование комплексного подхода к развитию научно-образовательной инфраструктуры современного инженерного университета

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Mikhail A. Anfyorov*
Clustering of multidimensional temporal data as part of information support for management decisions
- 17** *Danila S. Belyakov*
Architecture of a distributed system for testing Internet of Things devices at the development stage
- 29** *Andrey S. Zuev, Peter N. Sovietov, Ilya E. Tarasov*
Heterogeneous computing systems with hardware acceleration of massively parallel stream processing design
- 42** *Evgenii A. Khalturin, Alexey A. Kytmanov, Yuliya V. Vaynshteyn, Tatiana V. Zykova*
Software methods for curriculum processing, analysis and visualization

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 57** *Kirill V. Latyshev, Mihail S. Kostin, Konstantin A. Boikov*
Generation of radiovision signals by spectral saturation in transient distortion mode of integral microwave amplifiers for gesture recognition systems

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 69** *Artyom A. Egorenkov, Irina V. Danilova, Maria I. Bibinova, Sergei N. Chelyshkov, Alexei N. Vyaznikov, Konstantin S. Batalov*
Search of technological solutions aimed at reducing the number of image defects in a hybrid SWIR device
- 80** *Evgenii Ph. Pevtsov, Tatyana A. Demenkova, Yuri A. Korotaev, Alexander S. Sigov*
Physically unclonable functions in digital integrated circuits
- 103** *Natalia E. Sherstyuk, Kirill A. Brekhov, Elena D. Mishina*
Modeling of resonant excitation of ferroelectric lattice subsystem by terahertz radiation under nonequilibrium conditions

Mathematical modeling

- 113** *Ivan G. Lebo, Victoria A. Komarova, Maxim A. Ryzhkov*
Influence of piston nonuniformity and illumination on the formation of a hypersonic shock wave in a laser-driven shock wave
- 124** *Alexander S. Leontyev, Dmitry V. Zhmatov*
Performance analysis and timing characteristics in industrial networks with random and deterministic node distributions

Philosophical foundations of technology and society

- 134** *Stanislav A. Kudzh, Natalia B. Golovanova, Yuri G. Grafov*
Formation of a comprehensive approach to developing the scientific and educational infrastructure of a modern engineering university

УДК 004.021:65.012.26

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-7-16>

EDN VCTFHE



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Кластеризация многомерных временных данных в рамках информационной поддержки принимаемых управленческих решений

М.А. Анфёров[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: anfjorov@inbox.ru

• Поступила: 02.02.2025 • Доработана: 20.11.2025 • Принята к опубликованию: 09.02.2026

Резюме

Цели. Информационная поддержка принятия управленческих решений в различных предметных областях направлена на поиск оптимального варианта из множества альтернативных. Что касается принимаемых решений в части функционирования социально-экономических систем, то здесь широко используется кластерный анализ на многомерных данных, характеризующих эти системы, Цель работы – синтез и исследование методики анализа функционирования социально-экономических систем, построенного на кластеризации характеризующих их временных многомерных данных, с целью повышения эффективности принимаемых решений в управлении такими системами.

Методы. Использованы методы кластерного анализа, а также положения теории систем и математической статистики.

Результаты. Разработана методика анализа функционирования социально-экономических систем, использующая кластеризацию ее структурных элементов в пространстве временных многомерных данных. Анализ реализуется в три этапа. Во-первых, производится замена значений признаков на значения их дисперсий в рамках исследуемого временного интервала. Кластеризация с учетом новых значений признаков позволяет выявить объекты кластеризации с высокой неустойчивостью значений признаков во времени. Во-вторых, реализуется кластеризация во всех дискретных точках временной координаты с дальнейшим расчетом удаленностей объектов до центра своего кластера и их дисперсии. Анализ этих дисперсий также позволяет выявить объекты с высокой неустойчивостью данных. В-третьих, отслеживается изменение принадлежности определенному кластеру объектов, попавших ранее в поле зрения. Выявленные неустойчивости в данных позволяют косвенно судить о нестабильном функционировании анализируемой системы или умышленном искажении представленной информации.

Выводы. В рамках обоснования эффективности разработанной методики рассмотрено два случая: выявление умышленного искажения информации на примере налогового администрирования и случай выявления аномального функционирования регионов Российской Федерации на примере принятия решений в рамках управления их социально-экономическим развитием. Поведенный анализ показал хорошие результаты и позволяет рекомендовать предлагаемую методику к практическому использованию в информационных системах поддержки управленческих решений.

Ключевые слова: информационная поддержка, принятие решений, кластерный анализ, многомерные временные данные

Для цитирования: Анфёров М.А. Кластеризация многомерных временных данных в рамках информационной поддержки принимаемых управленческих решений. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-7-16>, <https://www.elibrary.ru/VCTFHE>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Clustering of multidimensional temporal data as part of information support for management decisions

Mikhail A. Anfyorov [@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: anfyorov@inbox.ru

• Submitted: 02.02.2025 • Revised: 20.11.2025 • Accepted: 09.02.2026

Abstract

Objectives. The aim of information support for management decision-making is to find the most optimal option. Cluster analysis of multivariate data characterizing socioeconomic systems is widely used. In this work, the author aims to increase the efficiency of decisions made to manage these systems based on the clustering of temporal multidimensional data.

Methods. The methods of cluster analysis were used, as well as the provisions of the theory of systems and mathematical statistics.

Results. A methodology for analyzing the functioning of socioeconomic systems was developed. The analysis is implemented in three stages. Firstly, clustering over the values of feature variances was applied. Secondly, the distance of clustering objects from the center of their cluster and their dispersion was calculated at the points of time coordinates. Thirdly, the change in belonging to a certain cluster of objects that came into view earlier was monitored. Unstable systems were then identified.

Conclusions. Two cases were considered to justify the effectiveness of the methodology developed herein. First, using the example of the tax administration, the detection of deliberate distortion of information was considered. Secondly, identifying the abnormal functioning of the regions of the Russian Federation using the example of decision-making in the framework of socioeconomic development management was considered. The analysis demonstrated good results and we can thus recommend the proposed methodology for practical use in information systems for supporting management decisions.

Keywords: information support, decision-making, cluster analysis, multivariate time data

For citation: Anfyorov M.A. Clustering of multidimensional temporal data as part of information support for management decisions. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-7-16>, <https://www.elibrary.ru/VCTFHE>

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Кластерный анализ [1], будучи эффективным механизмом интеллектуальных информационных технологий, используется в решении широкого класса задач, связанных с принятием решений, в различных предметных областях: в государственном управлении, например, при выстраивании социально-экономической политики на региональном уровне [2, 3], в налоговом регулировании [4, 5], в сферах образования [6] и медицины [7, 8], информатики [9, 10] и информационной безопасности [11], в области машиностроения [12, 13]. Широкий спектр исследований затрагивает процессы управления в сфере экономики при решении задач принятия решений, например, в рамках инвестиционного процесса [14], оценки финансовой устойчивости компаний IT¹-сектора [15] и др. Кроме принятия управленческих решений кластерный анализ используется также для поддержки принятия проектных решений [16, 17].

Однако все приведенные примеры используют статические (пространственные) данные, полученные в определенном срезе времени, в то время как анализ с учетом динамики свойств объектов, отраженных в данных, позволяет расширить возможности кластерного анализа при поддержке принятия управленческих решений.

Следует отметить исследования, реализуемые в данном направлении. Во-первых, исследуется кластеризация самих одномерных [18, 19] и многомерных [20] временных рядов, что повышает эффективность кластеризации, но не принятия решений. Эту же цель преследует переход от временной области данных к двумерной дискретной функции [21] с использованием непрерывного вейвлет-преобразования [22]. Включение параметра времени в состав пространства признаков при кластеризации [23] позволяет отразить динамику состояния анализируемых объектов. Кластеризация объектов как динамических систем изучена в работах [24, 25].

Более глубокая аналитика построена на выявлении картины динамики кластеризуемых объектов через динамику временных данных. Так, расширению аналитики посвящен подход, предполагающий кластеризацию объектов с учетом близости динамики временных рядов множества характеризующих их показателей [26]. При этом анализируются и сравниваются различные метрики и способы оценки такой близости, включая алгоритм динамического выравнивания (dynamic time warping, DTW) [27]. Исследование динамики кластерных структур в сетевых моделях фондовых

рынков позволило обозначить индикатор приближающегося кризиса в виде повышения устойчивости этих структур [28].

В данном исследовании информационная поддержка принимаемых управленческих решений строится на анализе скрытого влияния факторов на поведение (функцию) системы (рис. 1). Если явное влияние напрямую определяет принимаемое решение, то скрытое – требует его идентификации с использованием современных аналитических средств и информационных технологий, а также адекватной трактовки полученных результатов.

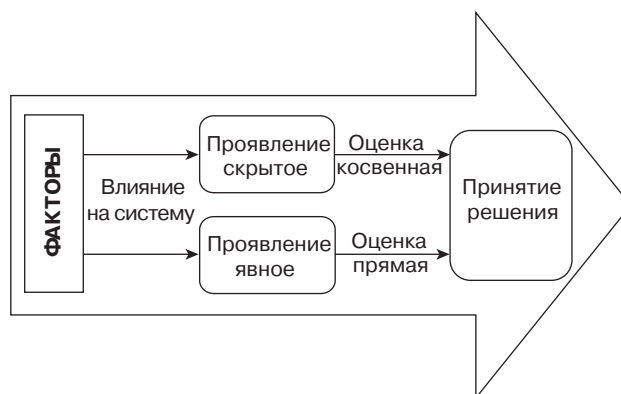


Рис. 1. Учет проявления влияния факторов на систему при принятии решения

При этом скрытое влияние факторов на анализируемую систему обнаруживается через изменчивое поведение исследуемых объектов по отношению к формируемым кластерам. Данная изменчивость может сигнализировать либо об умышленном искажении предоставляемых данных (например, в налоговых декларациях), либо о нестабильном функционировании системы, требующем управленческого вмешательства.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Используемый анализ временных данных построен на их кластеризации методом SOM² [29] в рамках предложенного ранее подхода, охватывающего различные уровни глубины исследования поведения системы [30]. Самоорганизующиеся карты Кохонена (SOM) позволяют усилить качественную составляющую анализа за счет визуализации формируемых кластеров с помощью данных карт. В предлагаемой методике для повышения адекватности принимаемого решения реализуются три инструмента анализа данных.

Первый инструмент представляет собой фильтр, ограничивающий мощность анализируемого множества признаков $\mathbf{p}_k^t = (p_{k1}^t, p_{k2}^t, \dots, p_{kn}^t)$, дискретно

¹ Information technology – информационные технологии.

² Self-organizing maps – самоорганизующиеся карты.

зависящих от временного параметра t (k – номер объекта в кластеризуемом множестве, m – количество признаков). Реализуется замена значений признаков на значения их дисперсий в рамках исследуемого временного интервала (w – количество фиксируемых временных координат):

$$D_{kj} = \frac{1}{w-1} \sum_{i=1}^w (p_{kj}^i - \bar{p}_{kj})^2, \quad \bar{p}_{kj} = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w p_{kj}^i. \quad (1)$$

Далее реализуется кластеризация в пространстве новых признаков с выявлением объектов, принадлежащих кластерам с высоким значением дисперсий, связанных с высокой неустойчивостью значений анализируемых признаков. Выявленные объекты фиксируются для дальнейшего анализа как системы с неустойчивыми временными данными. Следует отметить, что на заметку могут попасть объекты, высокая дисперсия признаков которых может быть вызвана трендом их значений, характеризующим положительную или отрицательную тенденцию. Для уточнения требуется дополнительный регрессионный анализ (см. пример ниже).

Второй инструмент анализа направлен на выявление неустойчивости образов кластеризуемых объектов внутри кластеров и включает выполнение ряда этапов.

На первом этапе реализуется кластеризация во всех дискретных точках временной координаты (r – номер координаты времени). Далее рассчитывается удаленность k -го объекта до центра своего кластера – d_k^r .

На втором этапе в каждый момент времени r рассчитывается дисперсия найденных на первом этапе значений d_k^r в интервале, охватывающем текущую и предыдущие временные координаты:

$$D_k^r = \frac{1}{r-1} \sum_{t=1}^r (d_k^t - \bar{d}_k^r)^2, \quad \bar{d}_k^r = \frac{1}{r} \sum_{t=1}^r d_k^t, \quad r = \overline{2, w}. \quad (2)$$

На третьем этапе временные зависимости дисперсий (2) отображаются в виде диаграммы, включающей все кластеризуемые объекты. Диаграмма позволяет на новом уровне выявить объекты с неустойчивыми временными данными.

Реализация третьего инструмента предполагает отслеживание возможных изменений принадлежности определенному кластеру объектов, попавших ранее в поле зрения (рис. 2). Подобные изменения позволяют косвенно судить (рис. 1) о нестабильном функционировании системы или умышленном искажении информации и позволяют уточнить полученные ранее выводы по объектам, попавшим в группу риска. Для этого удобнее всего воспользоваться построением диаграмм для данных объектов.

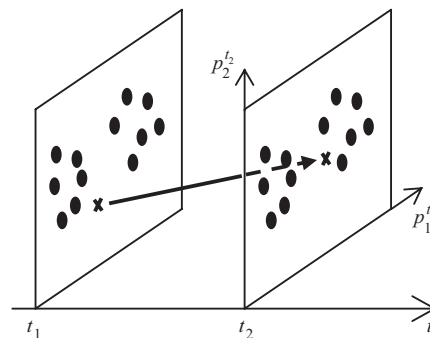


Рис. 2. Динамика результатов кластеризации

Второй и третий инструменты могут применяться в разной последовательности, а также параллельно.

Взаимосвязь реализуемых этапов в рамках методики анализа представлена блок-схемой соответствующего алгоритма (рис. 3).

ВЫЯВЛЕНИЕ УМЫШЛЕННОГО ИСКАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Применение предлагаемого анализа для выявления преднамеренного искажения информации продемонстрировано на примере налогового администрирования, когда необходимо принимать решение о планировании выездных налоговых проверок предприятий-налогоплательщиков. Изначально предполагается, что названное искажение позволяет с определенной вероятностью косвенно (рис. 1) судить о недобросовестности руководящего звена таких предприятий. Выбор параметров (признаков) для кластеризации осуществлен исходя из ряда предпочтений:

- доступности их расчета по бухгалтерской отчетности;
- их корреляции с риском банкротства (показатели отражены в соответствующей методике Федерального управления по делам о несостоятельности (банкротстве) при Государственном комитете Российской Федерации по управлению государственным имуществом;
- вхождением в модели Альтмана [31].

В результате для двадцати анализируемых предприятий было отобрано шестнадцать финансовых показателей, позволяющих оценивать платежеспособность этих предприятий, финансовую устойчивость их экономической системы, рентабельность производства продукции, а также деловую активность в отношении оборачиваемости запасов и задолженности (кредиторской и дебиторской). Динамика данных показателей отслеживалась за временной период в 8 кварталов.

Выполнение кластеризации в пространстве новых признаков (1), согласно предложенной методике, позволило выявить предприятия с высокой

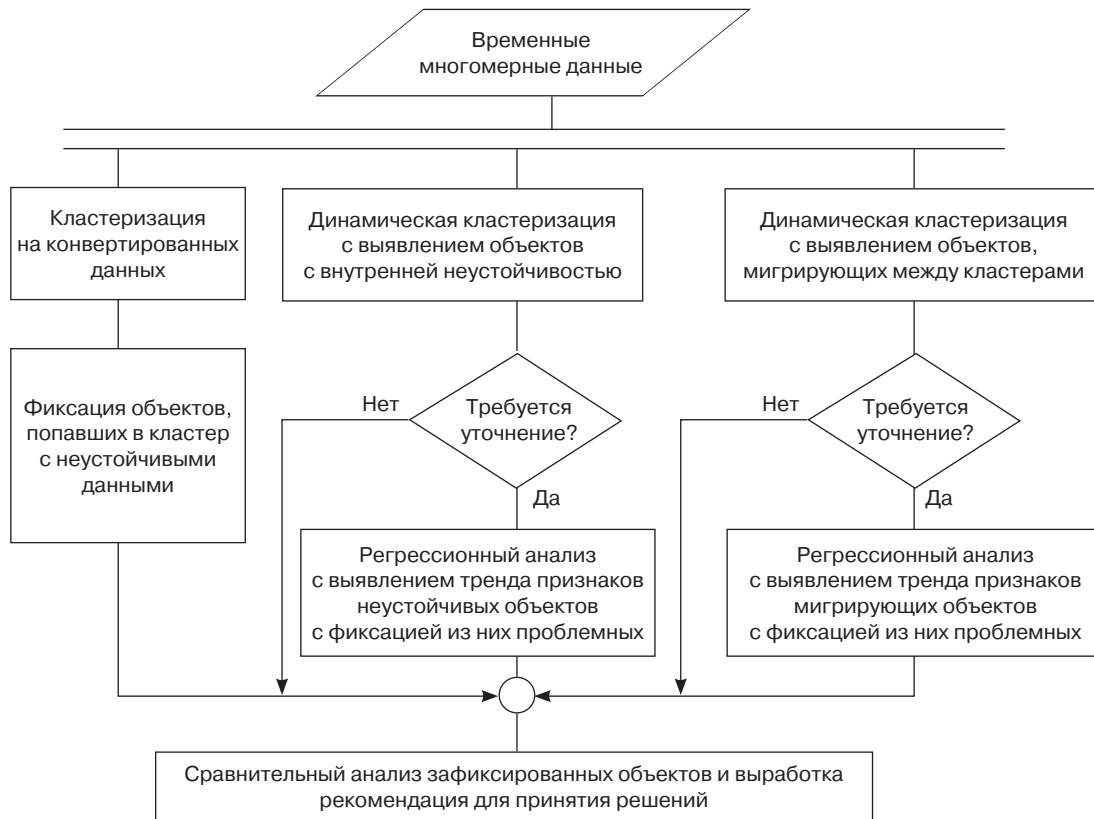


Рис. 3. Алгоритм реализации методики

неустойчивостью значений исходных данных (предприятия с условными номерами 4 и 12). По результатам кластеризации они оказались изолированы в своих кластерах.

Реализация анализа по выявлению внутри кластерной нестабильности по величине дисперсий (2) свелась к построению диаграммы (рис. 4). Картина поведения графиков на диаграмме позволила выявить критичные предприятия с нестабильностью данных, приведших к аномальному поведению графиков, соответствующих этим предприятиям. В группу проверяемых предприятий на данном

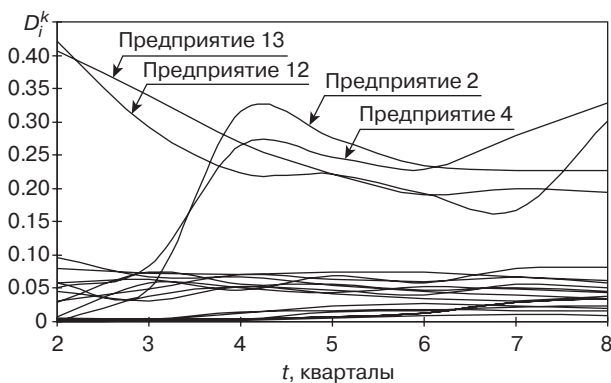


Рис. 4. Динамика дисперсий (2) при анализе предприятий

этапе попали отмеченные ранее предприятия 4 и 12, а также предприятия 2 и 13.

Миграции между кластерами (третий инструмент методики анализа) оказались подвержены предприятия 2, 4 и 12, уже отмеченные на предыдущих этапах анализа. Графическая иллюстрация в отношении предприятия 4 показана на рис. 5.

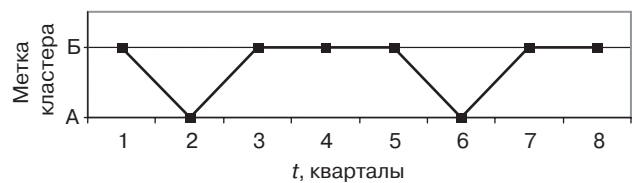


Рис. 5. Миграция предприятия 4 между кластерами

Таким образом, по результатам выполненного анализа были рекомендованы выездные налоговые проверки в отношении предприятий 2, 4 и 12, а также, по возможности, и для предприятия 13.

ВЫЯВЛЕНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ

Применение предлагаемого анализа для выявления аномального функционирования систем продемонстрировано на примере принятия решений в рамках

управления социально-экономическим развитием регионов Российской Федерации. В анализе использовались основные показатели, характеризующие состояние региональной социально-экономической системы³ за временной интервал с 2014 г. по 2020 г. (период равномерного поступательного развития). Что касается объемных показателей, то они были приведены к относительному виду делением на численность занятого населения региона. Из рассмотрения были исключены Республика Крым и г. Севастополь, социально-экономические системы которых в данном переходном для них периоде времени находились на пути к стабилизации. Не рассматривались г. Москва, Московская область и г. Санкт-Петербург, а также региональные структуры, входящие в состав областей (например, Ямало-Ненецкий автономный округ в составе Тюменской области).

В отличие от выше рассмотренного случая выявления умышленного искажения данных при динамическом кластерном анализе функционирования систем дисперсионные оценки необходимо использовать с учетом возможного тренда соответствующих показателей (характеристик системы), являющегося причиной высоких значений дисперсий.

В рамках рассматриваемого примера при кластеризации в пространстве дисперсий признаков (1) в кластер неустойчивости функционирования систем (больших значений дисперсий) попал регион 69 (Тверская область). Для выявления наличия тренда проведен регрессионный анализ с выявлением эмпирической зависимости от времени показателя $v = v(t)$, определяемого отношением валового регионального продукта (млрд руб.) к величине среднегодовой численности занятого населения (тыс. чел.) (рис. 6). Высокое значение коэффициента детерминации R^2 говорит об устойчивой положительной динамике данной характеристики, что позволяет исключить данный регион из кластера неустойчивых. Что касается других признаков, то проверка наличия у них тренда по данному региону дала положительный результат. Так для характеристики относительного объема отгруженных товаров собственного обрабатывающего производства подтверждено наличие устойчивого тренда $s = s(t)$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.77$.

Следует отметить, что для конкретного объекта кластеризации возможен случай, когда одни показатели имеют устойчивый тренд, а другие – стохастический разброс значений. В этом случае потребуются эвристическая оценка для принятия решения.

³ *Россия в цифрах: краткий статистический сборник*. М.: Росстат; 2020, 550 с. ISBN 978-5-89476-488-7. [*Rossiya v tsifrakh: kratkii statisticheskii sbornik (Russia in numbers: a short statistical collection)*]. Moscow: Rosstat; 2020, 550 p. (In Russ.). ISBN 978-5-89476-488-7]

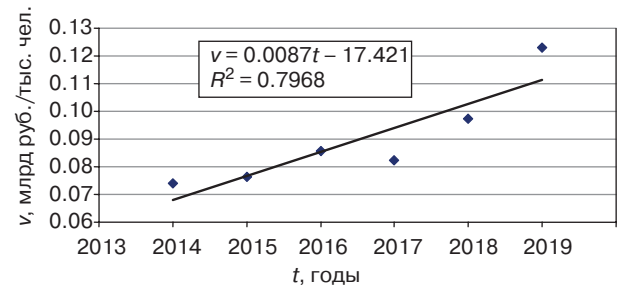


Рис. 6. Тренд показателя v для региона 69

Для других регионов, попавших в кластер неустойчивого функционирования (46 – Курская область, 23 – Красноярский край, 51 – Мурманская область, 76 – Ярославская область) отмечена высокая стохастичность характеризующих их признаков, что делает их кандидатами на повышенное внимание в части государственного социально-экономического регулирования.

Диаграмма, иллюстрирующая внутрикластерную нестабильность по величине дисперсий (2) (рис. 7) показала аномальное поведение графиков для уже отмеченных ранее регионов, к которым добавились регионы 2 (Республика Башкортостан) и 11 (Республика Коми).

На этапе выявления миграции регионов между кластерами (рис. 8) к рассмотрению были подключены регионы 65 (Сахалинская область) и 68 (Тамбовская область).

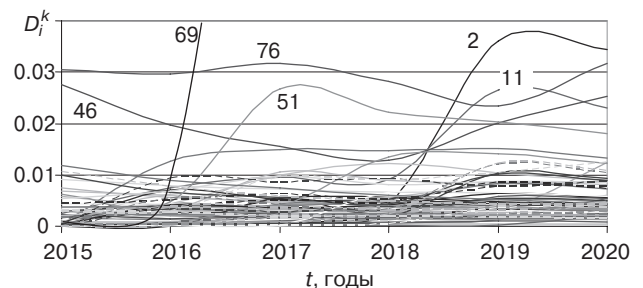


Рис. 7. Динамика дисперсий (2) при анализе регионов

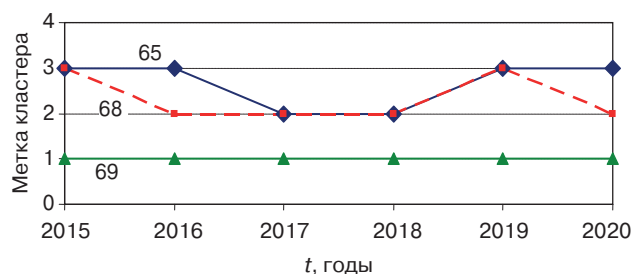


Рис. 8. Миграция регионов 65, 68 и 69 между кластерами

Отсутствие миграции региона 69 между кластерами лишней раз подтвердило хороший уровень его социально-экономического развития.

Регрессионный анализ добавленных регионов показал, что увеличение дисперсии (2) для регионов 2 и 11 во многом объясняется положительной динамикой их показателей (см. пример для региона 2 на рис. 9 с приемлемым значением R^2). Что касается регионов 65 и 68, то их миграция между кластерами определяется высокой стохастичностью экономических показателей (см. пример для региона 65 на рис. 9 с низким значением R^2), что требует принятия мер в рамках государственного регулирования.

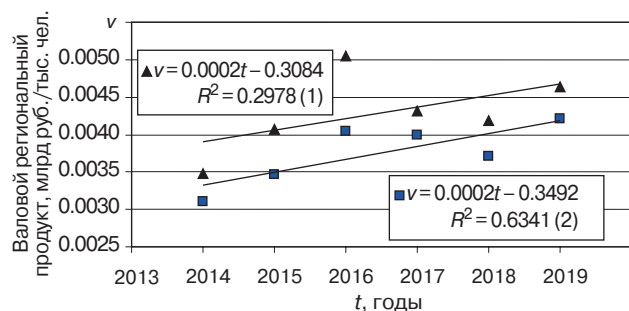


Рис. 9. Тренды показателя относительного объема валового регионального продукта:
(1) для региона 65 (черные треугольники),
(2) для региона 2 (синие квадраты)

Таким образом по результатам выполненного анализа даны рекомендации по выработке мер в рамках государственного регулирования по улучшению и стабилизации функционирования социально-экономической системы в регионах 46, 23, 51, 76, 65 и 68.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен подход к информационной поддержке принимаемых управленческих решений в условиях неопределенности, основанный на косвенной оценке влияния факторов на управляемую систему с использованием методики, базирующейся на кластерном анализе временных данных. Предлагаемая технология ориентирована на два класса задач: принятие решений в условиях возможного умышленного искажения данных и при выявлении нестабильного функционирования анализируемой системы.

Предложенные теоретические положения прошли практическую проверку на реальных данных при решении задач налогового администрирования и государственного регулирования функционирования региональных социально-экономических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфёров М.А. Генетический алгоритм кластеризации. *Russian Technological Journal*. 2019;7(6):134–150. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-134-150>
2. Замятина Е.Э. Кластеризация субъектов Российской Федерации по уровню развития креативных индустрий. *Прогрессивная экономика*. 2024;9:113–128. https://doi.org/10.54861/27131211_2024_9_113
3. Протасов Ю.М., Юров В.М. Кластеризация регионов РФ по уровню их социально-экономического развития. *Вестник Московского государственного областного университета. Серия Экономика*. 2022;2:95–103. <https://doi.org/10.18384/2310-6646-2022-2-95-103>
4. Анфёров М.А., Рашитова О.Б. SADT-моделирование системы налогообложения в Российской Федерации. *Экономика и управление: научно-практический журнал*. 2015;124(2):94–101. <https://www.elibrary.ru/tqjqfj>
5. Вылкова Е.С., Викторова Н.Г., Наумов В.Н., Покровская Н.В. Кластерный анализ регионов РФ для выявления территорий – драйверов устойчивого развития: налоговая компонента. *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. 2021;53:138–157. <https://doi.org/10.17223/19988648/53/11>
6. Гринберг Г.М., Николаева Ю.С., Хегай Л.Б. Кластерный подход к разработке электронных образовательных ресурсов для студентов технического университета. В сб.: *Решетневские чтения: Материалы XXV Международной научно-практической конференции*. Красноярск, 10–12 ноября 2021 г. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий; 2021. С. 685–687. <https://elibrary.ru/yjchna>
7. Носова С.А., Турлапов В.Е. Детектирование клеток мозга в оптической микроскопии на основе текстурных характеристик методами машинного обучения. *Программирование*. 2019;4:36–45. <https://doi.org/10.1134/S0132347419040058>
8. Хамад Ю.А., Зотин А.Г., Симонов К.В., Медиевский А.В., Чижова Т.Г. Обнаружение и оценка патологии молочной железы на основе нечеткой кластеризации и дискретного вейвлет преобразования. *Медицина и высокие технологии*. 2023;2:5–13. <https://www.elibrary.ru/ujqlwd>
9. Raja R., Ganeshkumar P. QoSTRP: надежный протокол маршрутизации на основе кластеризации для мобильных самоорганизующихся сетей. *Программирование*. 2018;6:28–41. <https://doi.org/10.31857/S013234740002763-4>
10. Кучуганов А.В., Кучуганов В.Н., Осколков П.П., Касимов Д.Р. Аппроксимация цветных изображений на основе кластеризации цветовой палитры и сглаживания границ сплайнами и дугами. *Программирование*. 2018;5:3–11. <https://doi.org/10.31857/S013234740001211-7>
11. Берешповлов И.С., Кравченко Ю.А., Слепцов А.Г. Алгоритм кластеризации данных для защиты конфиденциальной информации в сети интернет. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023;3(233):74–85. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-74-85>

12. Харахинов В.А., Сосинская С.С. Исследование способов кластеризации деталей машиностроения на основе нейронных сетей. *Программная инженерия*. 2017;8(4):170–176. <https://doi.org/10.17587/prin.8.170-176>
13. Кучуганов В.Н., Кучуганов А.В., Касимов Д.Р. Алгоритм кластеризации множества деталей по чертежам. *Программирование*. 2020;46(1):29–38. <https://doi.org/10.31857/S0132347420010045>
14. Матвеева И.Ю. Кластеризация розничных инвесторов и структура портфеля по классам активов. *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2023;4(142):180–184. <https://www.elibrary.ru/fnmsql>
15. Батрасова А.Д., Коновалова Т.В., Комаров П.И. Кластеризация как метод исследования финансовой устойчивости IT-компаний. *Управленческий учет*. 2022;(1-2):177–182. <https://www.elibrary.ru/xaufce>
16. Анфёров М.А. Формализация поиска структурных решений в САПР ТП. В сб.: *Информатика: проблемы, методы, технологии: Материалы XXII Международной научно-практической конференции*. Воронеж, Воронежский государственный университет, 10–12 февраля 2022 г. Воронеж: ВЭЛБОРН. 2022. С. 881–886. <https://elibrary.ru/dsdxhp>
17. Яковлев Д.Д., Петров Д.Ю. Применение разведочного анализа данных для кластеризации структур робототехнических сборочных комплексов. *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2024;17:71–75. <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2024-17-71-75>
18. Степанов М.А. Методика выявления структурных трансформаций временных рядов с использованием принципов нечеткой кластеризации. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2019;69:149–159. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2019-69-149-159>
19. Кладов Д.Е., Бериков В.Б., Климонтов В.В. Алгоритм кластеризации временных рядов и его применение для анализа гликемических кривых. В сб.: *ЗНАНИЯ – ОНТОЛОГИИ – ТЕОРИИ: Материалы IX Международной конференции*. Новосибирск, 02–06 октября 2023 г. Новосибирск: Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН; 2023. С. 154–161. <https://elibrary.ru/qzzzvz>
20. Тищенко А.К., Плисс И.П. Сегментация многомерных нестационарных временных рядов с помощью метода нечеткой кластеризации. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012;4(58):24–26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/segmentatsiya-mnogomernyh-nestatsionarnyh-vremennyh-ryadov-s-pomoschyu-metoda-nechetkoj-klasterizatsii>. Дата обращения 02.02.2025. / Accessed February 02, 2025.
21. Дуля И.С. Применение методов глубокого обучения к задаче кластеризации временных рядов. *Аллея науки*. 2021;1(5):974–978. <https://elibrary.ru/nokchy>
22. Hurley C., Mclean J. *Wavelet Analysis and Methods*. Waltham Abbey: ED-Tech Press; 2021, 366 p.
23. Спирина П.В., Семенова А.Р. Кластерный анализ динамики инновационной деятельности субъектов Российской Федерации. *Экономические исследования и разработки*. 2021;8:42–53. <https://elibrary.ru/oiquyo>
24. Жихалкина Н.Ф. Динамический подход к задаче кластеризации. *Математические структуры и моделирование*. 2000;5:133–139. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskij-podhod-k-zadache-klasterizatsii>. Дата обращения 02.02.2025. / Accessed February 02, 2025.
25. Рыжков Д.В. О методах кластеризации динамических временных рядов. В сб.: *Наука. технологии. Инновации: Сборник научных трудов XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых*. Новосибирск, 04–08 декабря 2023 г. Новосибирск: НГТУ; 2024. С. 178–182. <https://elibrary.ru/hykvdt>
26. Зайцев Р.Д. Исследование эффективности многомерной кластеризации временных рядов для анализа динамики научно-технического развития. *Перспективы развития информационных технологий*. 2015;25:7–13. <https://www.elibrary.ru/uhrwjt>
27. Ten Holt G.A., Reinders M.J.T., Hendriks E.A. Multi-dimensional dynamic time warping for gesture recognition. In: *Thirteenth Annual Conference on the Advanced School for Computing and Imaging*. Netherlands: V. 300. 2007, 8 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228740947>. Дата обращения 02.02.2025. / Accessed February 02, 2025.
28. Кочетугов А.А., Бацын М.В., Пардалос П.М. Динамика кластерных структур в сетях фондовых рынков. *Журнал новой экономической ассоциации*. 2015;4(28):12–30. <https://www.elibrary.ru/vdzrqn>
29. Kohonen T. *Self-Organizing Maps*. 3rd ed. Berlin – New York: Springer-Verlag; 2001, 521 p.
30. Анфёров М.А. Кластеризация в принятии решений. *Информационные технологии. Проблемы и решения*. 2020;2(11):97–102. <https://www.elibrary.ru/rwddvo>
31. Давыдова Г.В., Беликов А.Ю. Методика количественной оценки риска банкротства предприятий. *Управление риском*. 1999;3:13–20. <https://www.elibrary.ru/tdgdrb>

REFERENCES

1. Anfyorov M.A. Genetic clustering algorithm. *Russian Technological Journal*. 2019;7(6):134–150 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-134-150>
2. Zamyatina E.E. Clustering of constituent entities of the Russian Federation by the level of development of creative industries. *Progressivnaya ehkonomika = Progressive Economy*. 2024;9:113–128 (in Russ.). https://doi.org/10.54861/27131211_2024_9_113
3. Protasov Yu.M., Yurov V.M. Clusterization of the Regions of the Russian Federation by their Level Socio-Economic Development. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya Ehkonomika = Bulletin of Moscow Region State University. Series: Economics*. 2022;2:95–103 (in Russ.). <https://doi.org/10.18384/2310-6646-2022-2-95-103>
4. Anfyorov M.A., Rashitova O.B. SADT modeling of the taxation system in the Russian Federation. *Ehkonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskii zhurnal = Economics and Management: Research and Practice Journal*. 2015;124(2):94–101 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/tqjqfj>

5. Vylkova E.S., Viktorova N.G., Naumov V.N., Pokrovskaya N.V. Tax clusterization of regions of the Russian Federation to identify territories-drivers of sustainable development. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ehkonomika = Tomsk State University Journal of Economics*. 2021;53:138–157 (in Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988648/53/11>
6. Greenberg G.M., Nikolaeva Y.S., Hegay L.B. Cluster approach to development of electronic educational resources for students of the technical university. In: *Reshetnev Readings: Proceedings of the 25th International Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, November 10–12, 2021. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology; 2021. P. 685–687 (in Russ.). <https://elibrary.ru/yjchna>
7. Nosova S.A., Turlapov V.E. Detection of brain cells in optical microscopy based on textural features with machine learning methods. *Program. Comput. Soft.* 2019;45(4):171–179. <https://doi.org/10.1134/S0361768819040054>
[Original Russian Text: Nosova S.A., Turlapov V.E. Detection of brain cells in optical microscopy based on textural features with machine learning methods. *Programmirovaniye*. 2019;4:36–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0132347419040058>]
8. Hamad Y.A., Zotin A.G., Simonov K.V., Medievsky A.V., Chizhova I.G. Detection and evaluation of breast pathology based on fuzzy clustering and discrete wavelet transform. *Medsitsina i vysokie tekhnologii = Medicine and High Technology*. 2023;2:5–13 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/ujqlwd>
9. Raja R., Ganeshkumar P. QOSTRP: a trusted clustering based routing protocol for mobile ad-hoc networks. *Program. Comput. Soft.* 2018;44(6):407–416. <https://doi.org/10.1134/S0361768818060099>
[Original Russian Text: Raja R., Ganeshkumar P. QOSTRP: a trusted clustering based routing protocol for mobile ad-hoc networks. *Programmirovaniye*. 2018;6:28–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S013234740002763-4>]
10. Kasimov D.R., Kuchuganov A.V., Kuchuganov V.N., Oskolkov P.P. Approximation of color images based on the clusterization of the color palette and smoothing boundaries by splines and arcs. *Program. Comput. Soft.* 2018;44(5):295–302. <https://doi.org/10.1134/S0361768818050043>
[Original Russian Text: Kasimov D.R., Kuchuganov A.V., Kuchuganov V.N., Oskolkov P.P. Approximation of color images based on the clusterization of the color palette and smoothing boundaries by splines and arcs. *Programmirovaniye*. 2018;5:3–11 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S013234740001211-7>]
11. Bereshpolov I.S., Kravchenko Yu.A., Sleptsov A.G. Data clustering algorithm for protecting confidential information on the internet. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023;3(233):74–85 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-74-85>
12. Kharakhinov V.A., Sosinskaya S.S. The visualization methods for cluster analysis results of mechanical engineering components based on neural network. *Programmnyaya inzheneriya = Software Engineering*. 2017;8(4):170–176 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/prin.8.170-176>
13. Kuchuganov V.N., Kuchuganov A.V., Kasimov D.R. Clustering algorithm for a set of machine parts on the basis of engineering drawings. *Program. Comput. Soft.* 2020;46(1):25–34. <https://doi.org/10.1134/S0361768820010041>
[Original Russian Text: Kuchuganov V.N., Kuchuganov A.V., Kasimov D.R. Clustering algorithm for a set of machine parts on the basis of engineering drawings. *Programmirovaniye*. 2020;46(1):29–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0132347420010045>
14. Matveeva I.Yu. Clustering of retail investors and portfolio structure by asset class. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2023;4(142):180–184 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/fnmsql>
15. Batrasova A.D., Konovalova T.V., Komarov P.I. Clustering as a method of studying the financial stability of IT companies. *Upravlencheskii uchet = Management Accounting*. 2022;(1-2):177–182 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/xaufce>
16. Anforyov M.A. Formalization of the structural solutions search for CAD/CAM System. In: *Computer Science: Problems, Methods, Technologies: Proceedings of the 22nd International Scientific and Practical Conference*. Voronezh, Voronezh State University, February 10–12, 2022. Voronezh: VELBORN; 2022. P. 881–886 (in Russ.). <https://elibrary.ru/dsdxhp>
17. Yakovlev D.D., Petrov D.Yu. Application of exploratory data analysis for clusterization of robotic assembly complexes structures. *Avtomatizirovannoe proektirovaniye v mashinostroyeniye*. 2024;17:71–75 (in Russ.). <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2024-17-71-75>
18. Stepanov M.A. Method to identify structural transformations of time series using fuzzy clustering principles. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan state Radioengineering University*. 2019;69:149–159 (in Russ.). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2019-69-149-159>
19. Klavov D.E., Berikov V.B., Klimontov V.V. Time Series Clustering Algorithm and Its Application for Glycemic Curve Analysis. In: *KNOWLEDGE – ONTOLOGY – THEORY: Proceedings of the 9th International Conference*. Novosibirsk, October 2–6, 2023. Novosibirsk: Sobolev Institute of Mathematics, SB RAS; 2023. P. 154–161 (in Russ.). <https://elibrary.ru/qqzzvw>
20. Tishhenko A.K., Pliss I.P. Segmentation of Multidimensional Nonstationary Time Series Using the Fuzzy Clustering Method. *Vostochno-Evropeskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii*. 2012;4(58):24–26 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/segmentatsiya-mnogomernyh-nestatsionarnyh-vremennyh-ryadov-s-pomoschyu-metodanechetkoy-klasterizatsii>. Accessed February 02, 2025.
21. Dulya I.S. Applying deep learning techniques to the time series clustering problem. *Alleya nauki*. 2021;1(5):974–978 (in Russ.). <https://elibrary.ru/nokchy>
22. Hurley C., Mclean J. *Wavelet Analysis and Methods*. Waltham Abbey: ED-Tech Press; 2021, 366 p.
23. Spirina P.V., Semenova A.R. Cluster analysis of the dynamics of innovation activities of the constituent entities of the Russian Federation. *Ehkonomicheskie issledovaniya i razrabotki = Economic Development Research Journal*. 2021;8:42–53 (in Russ.). <https://elibrary.ru/oiqybo>

24. Zhikhalkina N.F. Dynamic approach to clustering problem. *Matematicheskie struktury i modelirovanie = Mathematical Structures and Modeling*. 2000;5:133–139 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskiy-podhod-k-zadache-klasterizatsii>. Accessed February 02, 2025.
25. Ryzhkov D.V. About Dynamic Time Series Clustering Methods. In: *Science. Technologies. Innovations: Collection of Scientific Papers of the 17th All-Russian Scientific Conference of Young Scientists*. Novosibirsk, December 04–08, 2023. Novosibirsk: NSTU; 2024. P. 178–182 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xykvdt>
26. Zaitsev R.D. Study of the Effectiveness of Multivariate Clustering of Time Series for the Analysis of the Dynamics of Scientific and Technological Development. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii*. 2015;25:7–13 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/uhrwjt>
27. Ten Holt G.A., Reinders M.J.T., Hendriks E.A. Multi-dimensional dynamic time warping for gesture recognition. In: *Thirteenth Annual Conference on the Advanced School for Computing and Imaging*. Netherlands: V. 300. 2007, 8 p. Available from URL: <https://www.researchgate.net/publication/228740947>. Accessed February 02, 2025.
28. Kocheturov A.A., Batsyn M.V., Pardalos P.M. Dynamics of cluster structures in stock market networks. *Zhurnal novoi ehkonomicheskoi assotsiatsii = The Journal of the New Economic Association*. 2015;4(28):12–30 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vdzrqn>
29. Kohonen T. *Self-Organizing Maps*. 3rd ed. Berlin – New York: Springer-Verlag; 2001, 521 p.
30. Anfyorov M.A. Clustering in decision-making. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya*. 2020;2(11):97–102 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/rwddvo>
31. Davydova G.V., Belikov A.Yu. Methodology for Quantitative Assessment of Enterprise Bankruptcy Risk. *Upravlenie riskom*. 1999;3:13–20 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/tdgdrb>

Об авторе

Анфёров Михаил Анисимович, д.т.н., профессор, кафедра «Предметно-ориентированные информационные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anfyorov@inbox.ru. SPIN-код РИНЦ 4829-2523, <https://orcid.org/0000-0003-2853-6184>

About the Author

Mikhail A. Anfyorov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Domain-Specific Information Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anfyorov@inbox.ru. RSCI SPIN-code 4829-2523, <https://orcid.org/0000-0003-2853-6184>

УДК 004.415.53
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-17-28>
EDN XDBAIA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Архитектура распределенной системы тестирования устройств интернета вещей на этапе их разработки

Д.С. Беляков[@]

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: cauze4concern@yandex.ru

• Поступила: 11.07.2025 • Доработана: 15.10.2025 • Принята к опубликованию: 06.02.2026

Резюме

Цели. Цель работы заключается в разработке архитектуры распределенной системы тестирования устройств интернета вещей (Internet of Things, IoT), обеспечивающей защищенную передачу тестовых сценариев и их изолированное исполнение на исполнительных модулях. Актуальность исследования обусловлена стремительным ростом числа IoT-устройств, функционирующих в недоверенных вычислительных средах, где процесс тестирования может создавать риски утечки конфиденциальных данных или несанкционированного вмешательства в программное обеспечение.

Методы. Проведен сравнительный анализ существующих решений, таких как *NI TestStand*, *MagicDAQ*, *PHiLIP* и *KEOLABS ContactLAB*. Выполнено сопоставление их архитектурных компонентов и процессов жизненного цикла тестовых сценариев.

Результаты. На основании анализа выделены основные этапы жизненного цикла, на которых применяются рассмотренные инструменты: подготовка и хранение, передача и интерпретация, взаимодействие с тестируемым устройством, регистрация и анализ результатов. Кроме того, проведено сравнение существующих и предложенного архитектурных решений по ключевым характеристикам: предметная область применения, тип архитектуры (распределенная или централизованная), среда исполнения тестовых сценариев, масштабируемость системы, уровень изоляции среды исполнения, наличие механизмов защиты и возможность удаленного управления. Результаты работы представлены в виде предложенной архитектуры, включающей управляющий модуль и автономные исполнительные модули с изолированной виртуальной средой исполнения *MicroPython*. Для обеспечения безопасности предусмотрена передача тестовых сценариев по зашифрованному каналу связи с использованием протоколов *CoAP*¹ и *DTLS*², а также выполнение кода тестовых сценариев в ограниченной среде, изолированной от основной операционной системы.

¹ Constrained application protocol – облегченный протокол интернета вещей.

² Datagram transport layer security – протокол передачи данных, обеспечивающий защищенность соединений для протоколов, использующих датаграммы.

Выводы. Проведенный сравнительный анализ продемонстрировал, что предлагаемое решение устраняет ключевые ограничения аналогов, связанные с отсутствием механизмов шифрования и изоляции исполнения. Разработанная архитектура повышает безопасность и надежность процесса тестирования IoT-устройств и может использоваться в недоверенных вычислительных средах для защиты интеллектуальной собственности и логики тестовых сценариев.

Ключевые слова: интернет вещей, IoT, функциональное тестирование, архитектура тестирования, тестовые сценарии

Для цитирования: Беляков Д.С. Архитектура распределенной системы тестирования устройств интернета вещей на этапе их разработки. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):17–28. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-17-28>, <https://www.elibrary.ru/XDBAIA>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Architecture of a distributed system for testing Internet of Things devices at the development stage

Danila S. Belyakov[@]

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: cauze4concern@yandex.ru

• Submitted: 11.07.2025 • Revised: 15.10.2025 • Accepted: 06.02.2026

Abstract

Objectives. The paper sets out to develop an architecture for a distributed testing system for Internet of Things (IoT) devices to ensure secure transmission and the isolated execution of test scenarios on dedicated execution modules. The study takes account of the rapid growth in the number of IoT devices operating in untrusted computing environments, in which the testing process can pose a risk of confidential data leakage or unauthorized interference with software components.

Methods. A comparative analysis of existing solutions such as *NI TestStand*, *MagicDAQ*, *PHILIP*, and *KEOLABS ContactLAB* was conducted. Architectural components and test scenario life-cycle processes were examined and compared.

Results. The analysis identified the main stages of the test scenario life cycle, including preparation and storage of scripts, transmission and interpretation, interaction with the device under test, as well as registration and analysis of results. In addition, existing and proposed architectural solutions were compared according to the following key characteristics: application domain; type of architecture (distributed or centralized); test scenario execution environment; system scalability; level of execution isolation; availability of protection mechanisms; capability for remote management. The results of the study are presented in the form of a proposed architecture that includes a control module and autonomous execution modules with an isolated virtual MicroPython environment. To ensure security, test scenarios are transmitted over an encrypted communication channel using constrained application protocol and datagram transport layer security (protocol, while the execution of test code takes place in a restricted environment isolated from the main operating system.

Conclusions. The comparative analysis confirmed that the proposed solution eliminates the key limitations of existing solutions, namely the lack of encryption mechanisms and isolation of execution. The developed architecture enhances the security and reliability of the IoT device testing process, offering protection for intellectual property and test scenario logic in untrusted computing environments.

Keywords: Internet of Things, IoT, functional testing, testing architecture, test scenarios

For citation: Belyakov D.S. Architecture of a distributed system for testing Internet of Things devices at the development stage. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):17–28. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-17-28>, <https://www.elibrary.ru/XDBAIA>

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Массовое распространение устройств интернета вещей обуславливает необходимость соблюдения высоких требований к их качеству, безопасности и надежности. В этих условиях тестирование приобретает особую значимость, т.к. позволяет не только выявить и устранить потенциальные неисправности, но и убедиться в том, что устройства соответствуют заданным техническим требованиям и способны стабильно функционировать в реальных условиях эксплуатации [1, 2].

В отличие от традиционного программного обеспечения, тестирование устройств интернета вещей сопровождается рядом специфических сложностей. Оно охватывает как аппаратные, так и программные компоненты, требует учета множества коммуникационных протоколов, ограниченных вычислительных ресурсов и особенностей низкоуровневых интерфейсов. Дополнительную сложность вносит тот факт, что тестирование нередко передается на аутсорсинг сторонним организациям, которые не всегда являются доверенными, что создает риски несанкционированного вмешательства и компрометации результатов [3].

В связи с этим цель данного исследования заключается в анализе существующих решений, направленных на тестирование устройств интернета вещей, и в разработке новой архитектуры распределенной системы тестирования, учитывающей выявленные недостатки.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

С учетом особенностей устройств интернета вещей, тестирование можно разделить на три основных уровня [4–6]: устройство, сеть и система.

Тестирование устройства сосредоточено на проверке самого устройства как отдельной единицы. Оно охватывает как аппаратные компоненты (микроконтроллер, датчики, исполнительные модули), так и встроенное программное обеспечение. В первую

очередь проверяется корректность работы периферийных интерфейсов (SPI³, UART⁴ и др.), обеспечивающих связь микроконтроллера с внешними модулями. Во вторую очередь оцениваются логика прошивки, алгоритмы обработки данных, производительность и надежность работы устройства в условиях нагрузок или помех.

Тестирование сети фокусируется на коммуникационной инфраструктуре. Измеряются такие параметры, как пропускная способность, задержки, надежность и масштабируемость используемых каналов связи (Wi-Fi, сотовые сети, LPWAN⁵ и др.), чтобы гарантировать необходимое качество обслуживания устройств интернета вещей [7].

Тестирование системы, напротив, охватывает весь комплекс устройств и инфраструктуру: проверяется взаимодействие нескольких устройств друг с другом, с шлюзами и облачной платформой, а также корректность сквозной обработки данных и пользовательских сценариев. Это комплексное тестирование интеграции, при котором отрабатываются сценарии от события на устройстве до получения данных в облаке и обратной реакции.

Таким образом, каждый уровень тестирования необходим для комплексной оценки функционирования систем интернета вещей, поскольку охватывает различные аспекты их работы – от аппаратных компонентов до взаимодействия устройств в распределенной среде.

2. АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

Инструменты тестирования представляют собой программные или аппаратно-программные средства, предназначенные для автоматизации и упрощения

³ Serial peripheral interface – последовательный периферийный интерфейс.

⁴ Universal asynchronous receiver-transmitter – универсальный асинхронный приемопередатчик.

⁵ Low-power wide-area network – энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия.

процесса проверки устройств интернета вещей. Их основная задача – поддержка специалистов при оценке различных характеристик, включая функциональность, производительность, устойчивость и безопасность. Такие инструменты позволяют воспроизводить широкий спектр сценариев эксплуатации и моделировать условия среды, обеспечивая тем самым более достоверную проверку поведения устройств в различных условиях.

В большинстве современных исследований и разработок в области тестирования интернета вещей основное внимание уделяется системному или сетевому уровням тестирования. Наиболее широко представлены решения, ориентированные на проверку корректности реализации протоколов (CoAP⁶, MQTT⁷, 6LoWPAN⁸ и др.), совместимости узлов, производительности и надежности сетевых соединений. Платформы, такие как PatIoT [8], Hector [9], F-Interop [10], MATTER [11], Eclipse IoT-Testware [12], как правило, используют механизмы виртуализации, что позволяет проводить масштабируемое тестирование архитектурных сценариев без участия реального физического оборудования.

Реализация проверок на уровне физических устройств обычно ограничивается узкоспециализированными решениями и менее формализована. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть архитектуры систем, ориентированных именно на уровень устройства, и провести их сопоставление. Базовая архитектура системы тестирования, представленная на рис. 1, включает следующие компоненты:

- управляющий модуль – осуществляет координацию запуска тестов, а также распределение заданий между исполнительными модулями;
- исполнительный модуль – одно или несколько устройств, непосредственно взаимодействующих с тестируемым устройством через физические интерфейсы;
- тестируемое устройство – объект, в отношении которого проводится тестирование.

В результате анализа предметной области выявлены инструменты, применяемые на уровне тестирования устройств.

⁶ Constrained application protocol – облегченный протокол интернета вещей.

⁷ Message queuing telemetry transport – упрощенный протокол обмена данными. [Message queuing telemetry transport is a lightweight, publish-subscribe, machine-to-machine network protocol for message queue/message queuing service.]

⁸ IPv6 over low power wireless personal area networks – стандарт взаимодействия по протоколу IPv6 поверх маломощных беспроводных персональных сетей стандарта IEEE 802.15.4. [IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks, based on the IEEE 802.15.4 standard.]

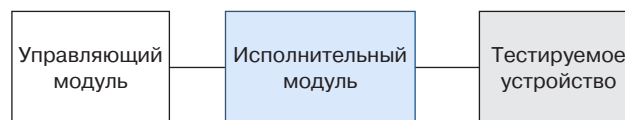


Рис. 1. Типовая архитектура системы тестирования

*NI TestStand*⁹ представляет собой коммерческую систему управления тестированием, которая интегрируется со средой программирования измерительных процессов *NI LabView*. Архитектура системы представлена на рис. 2.

Управляющий модуль представляет собой программу, установленную на персональном компьютере (ПК) и предназначенную для централизованного управления автоматизированными исполнительными модулями. Управляющий модуль также занимается регистрацией результатов тестирования, обеспечивая сбор и визуализацию результатов.

Исполнительные модули представляют собой системы сбора данных, подключенные к управляющему модулю, которые взаимодействуют непосредственно с тестируемым устройством через физические интерфейсы, выполняя команды тестирования.

Среда исполнения сценариев находится на управляющем модуле непосредственно в операционной системе (ОС). Безопасность системы реализуется через встроенные функции ОС, обеспечивая контроль ресурсов и результатов выполнения тестирования.

Функциональные возможности *NI TestStand* включают создание тестовых сценариев, которые могут выполняться как для одного устройства, так и для нескольких устройств одновременно, при этом тестирование координируется посредством параллельного взаимодействия нескольких управляющих модулей через локальную сеть. Однако такое взаимодействие ограничено внутренней сетью предприятия или лаборатории, т.к. система изначально не предусматривает полноценного удаленного управления через интернет-соединение. Тем не менее, *NI TestStand* предоставляет командный интерфейс, который позволяет инициировать запуск тестирования из внешних систем непрерывной интеграции (continuous integration, CI).

Таким образом, *NI TestStand* представляет собой локальную централизованную систему тестирования с развитым пользовательским интерфейсом и поддержкой процессов непрерывной интеграции, однако не обладающую встроенными механизмами распределенной обработки или изолированной работы тестовых модулей.

⁹ TestStand Release Notes. <https://www.ni.com/en/support/documentation/release-notes/product.teststand.html>. Дата обращения 07.07.2025. / Accessed July 07, 2025.

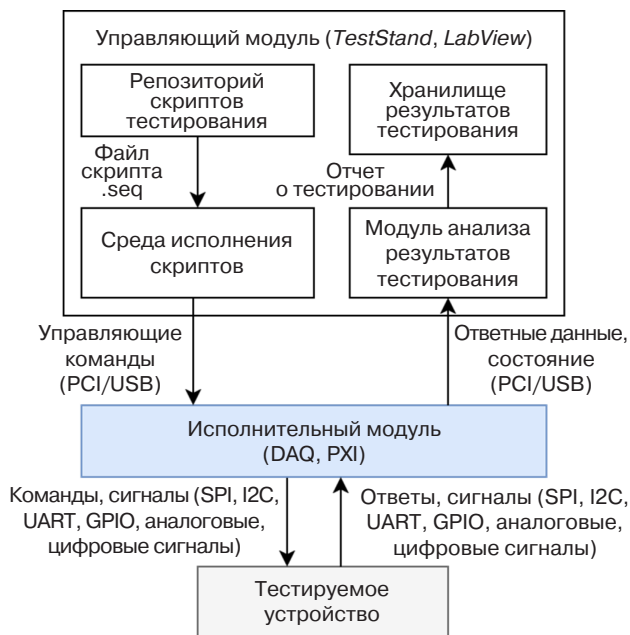


Рис. 2. Архитектура тестирования *NI TestStand* для одного устройства. PCI (peripheral component interconnect) – шина ввода-вывода для подключения периферийных устройств к материнской плате компьютера; USB (universal serial bus) – универсальная последовательная шина; I2C (inter-integrated circuit) – последовательная асимметричная шина; GPIO (general purpose input/output) – интерфейс ввода/вывода общего назначения; DAQ (data acquisition) – программно-аппаратный комплекс для сбора данных; PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) – расширение PCI для измерительных систем

*MagicDAQ*¹⁰ представляет собой исполнительный модуль, который соединяется по интерфейсу USB с управляющим модулем (ПК), как показано на рис. 3. Вся логика тестирования реализуется на управляющем модуле путем выполнения тестовых сценариев на языке Python, которые отправляют команды на исполнительный модуль по USB. *MagicDAQ* не является полноценно распределенной системой или облачным сервисом – это периферийный модуль для локального ПК. Масштабируемость определяется количеством доступных портов USB. Поскольку сценарии тестов пишутся на Python и передаются через локальную связь, безопасность реализуется через встроенные средства ОС.

Таким образом, *MagicDAQ* характеризуется как специализированное решение для локального применения в измерительных системах с ограниченными возможностями масштабирования и отсутствием механизмов распределенной обработки данных.

¹⁰ *MagicDAQ* Docs. https://magicdaq.github.io/magicdaq_docs/. Дата обращения 07.07.2025. / Accessed July 07, 2025.

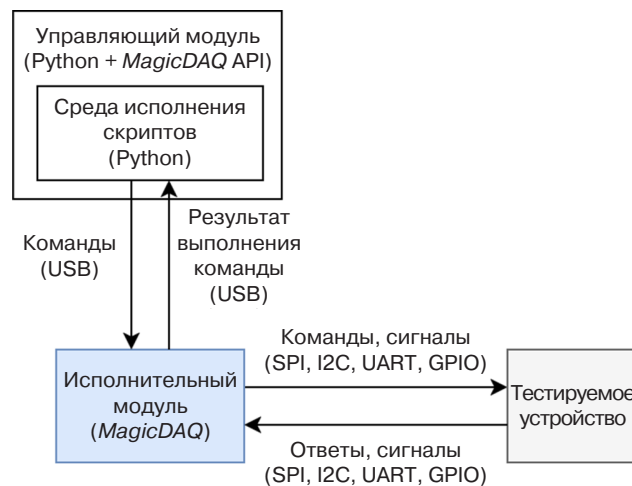


Рис. 3. Архитектура тестирования *MagicDAQ*. API (application programming interface) – программный интерфейс приложений

PHiLIP [8] представляет собой программно-аппаратную платформу, разработанную для автоматизированного тестирования периферийных интерфейсов микроконтроллеров во встроенных системах, включая устройства интернета вещей.

Архитектура системы тестирования *PHiLIP* построена на распределенной модели, в которой центральным управляющим модулем выступает сервер непрерывной интеграции, например, Jenkins, интегрированный с системой контроля версий Git для хранения и актуализации тестовых сценариев. Как показано на рис. 4, управляющий модуль отвечает за координацию тестовых запусков, хранение и распределение тест-кейсов, передачу прошивок на тестируемые устройства и сбор данных о результатах тестирования для их дальнейшего анализа.

Каждый исполнительный модуль реализован на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi (производитель – Raspberry Pi Holdings plc, Великобритания) и выполняет роль промежуточного звена между CI-сервером и аппаратным интерфейсным модулем *PHiLIP*. На исполнительном модуле осуществляется запуск тестовых сценариев в среде Robot Framework¹¹, а также выполняется прошивка тестируемых устройств через интерфейсы SWD¹² или JTAG¹³ для загрузки новых версий программного обеспечения. Взаимодействие с интерфейсным модулем *PHiLIP* происходит по интерфейсу UART.

Интерфейсный модуль *PHiLIP*, в свою очередь, отвечает за генерацию и регистрацию сигналов по физическим интерфейсам тестируемого устройства,

¹¹ Robot Framework. <https://robotframework.org/>. Дата обращения 07.07.2025. / Accessed July 07, 2025.

¹² Serial wire debug – двухпроводной протокол отладки.

¹³ Joint test action group – специализированный аппаратный интерфейс.

включая SPI, I2C, UART и GPIO. Он эмулирует поведение внешней среды устройства и фиксирует ответы тестируемого устройства, которые затем возвращаются к исполнительному модулю и далее в управляющий модуль для анализа результатов тестирования.

Архитектура системы допускает масштабирование, как показано на рис. 5: к одному управляющему модулю могут быть подключены несколько исполнительных модулей, каждый из которых управляет своим экземпляром интерфейсного модуля и тестируемым устройством. Такая структура позволяет выполнять параллельное тестирование разных устройств, обеспечивая при этом централизованное управление и сбор результатов. Однако в работе [8] не описаны механизмы обеспечения информационной безопасности: не уточнено, каким образом обеспечивается изоляция исполнения тест-кейсов, защита от несанкционированного доступа и контроль целостности при передаче тестовых сценариев.

KEOLABS ContactLAB¹⁴ представляет собой коммерческую программно-аппаратную платформу, предназначенную для функционального тестирования смарт-карт, микроконтроллеров с модулями безопасности (Secure Element), а также устройств с поддержкой бесконтактных интерфейсов NFC¹⁵ и ISO 7816¹⁶. Платформа активно используется в сертификационных испытаниях и при разработке средств аутентификации и идентификации.

Архитектура решения представлена на рис. 6 и основана на использовании программного управляющего модуля SCRIPTIS¹⁷, установленного на ПК, и аппаратного исполнительного модуля ContactLAB HW, выполняющего генерацию команд, измерение временных характеристик и регистрацию сигналов

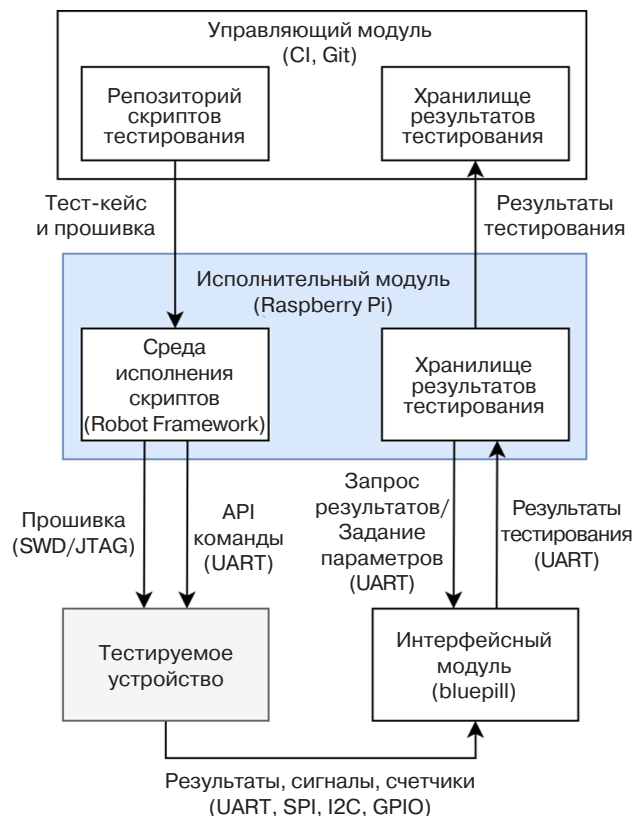


Рис. 4. Архитектура тестирования PHiLIP для одного тестируемого устройства

от тестируемого устройства. Взаимодействие между управляющим и исполнительным модулем происходит по интерфейсу USB или Ethernet. Исполнение тестов полностью сосредоточено на одном рабочем месте без возможности распределенного тестирования или удаленного доступа.

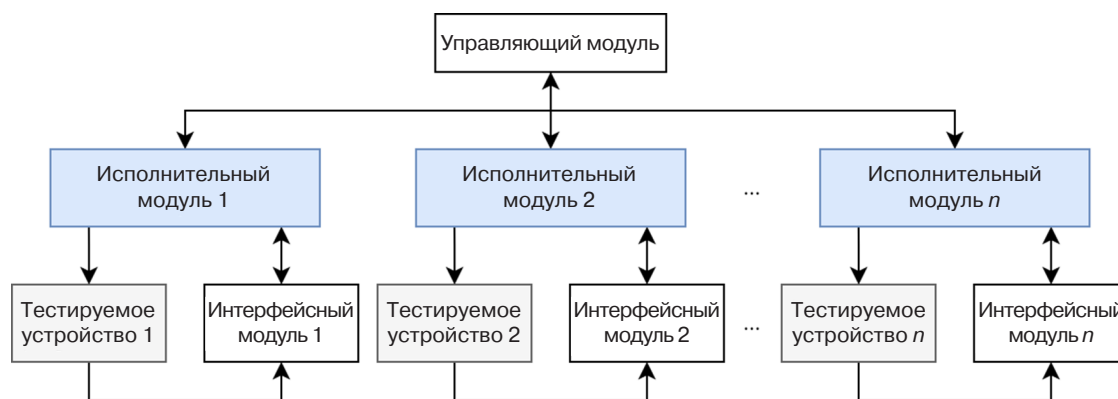


Рис. 5. Архитектура тестирования PHiLIP для нескольких тестируемых устройств

¹⁴ Contact Tester. <https://www.keolabs.com/products/platforms/contact-tester>. Дата обращения 07.07.2025. / Accessed July 07, 2025.

¹⁵ Near field communication – технология беспроводной передачи данных малого радиуса действия. [Near field communication (NFC) is a technology for transmitting data wirelessly over short distances.]

¹⁶ ISO/IEC 7816-1 Identification cards – Integrated circuit cards. <https://www.iso.org/standard/54089.html>. Дата обращения 07.07.2025. / Accessed July 07, 2025.

¹⁷ SCRIPTIS: an intuitive testing environment. <https://www.keolabs.com/products/solutions/emvco-11-payment-testing#>. Дата обращения 07.07.2025. / Accessed July 07, 2025.

Масштабируемость возможна лишь путем увеличения количества стендов и ручной координации их работы. Архитектурно не предусмотрены ни централизованный управляющий модуль, ни параллельное выполнение сценариев на множестве устройств.

Безопасность логики тестирования обеспечивается в рамках закрытой среды *SCRIPTIS* и встроенных в нее механизмов доступа. Выполнение тестовых сценариев осуществляется в стандартной пользовательской среде ОС.

Таким образом, *KEOLABS* представляет собой платформу низкоуровневого тестирования защищенных устройств в условиях лабораторной среды. Ее архитектура ориентирована на централизованную эксплуатацию и не имеет механизмов удаленного доступа или защищенного распределенного исполнения тестов.

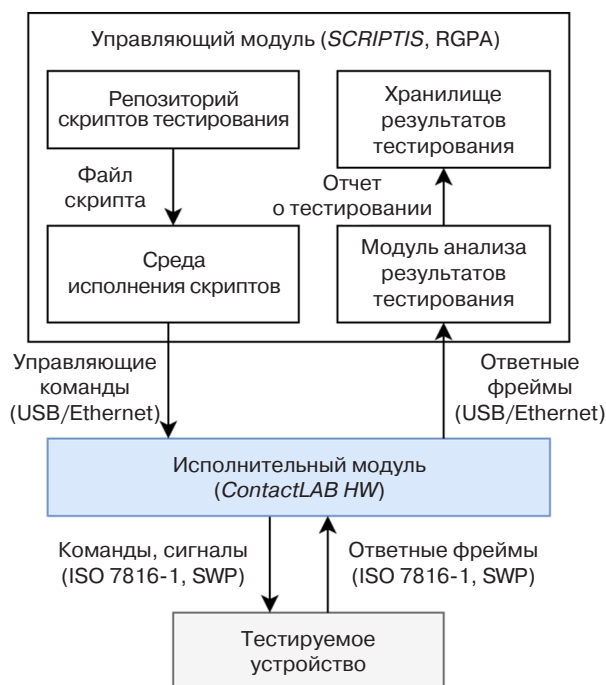


Рис. 6. Архитектура тестирования *KEOLABS ContactLAB*. *RGPA* (real-time general purpose analyzer) – анализатор общего назначения реального времени; *SWP* (single wire protocol) – однопроводной протокол

3. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕСТИРОВАНИЯ

На основании проведенного обзора архитектур существующих систем тестирования можно выделить ряд типовых процессов. Эти процессы, представленные на рис. 7, формируют общий сценарий функционирования подобных систем независимо от конкретной реализации. Такие процессы можно определить как последовательность этапов жизненного цикла тестового сценария:

- 1) подготовка и хранение тестовых сценариев;
- 2) планирование и запуск тестовых сценариев;
- 3) передача тестовых сценариев на исполнительный модуль;
- 4) интерпретация тестовых сценариев;
- 5) взаимодействие с тестируемым объектом;
- 6) регистрация результатов тестирования;
- 7) анализ и формирование отчетов.

На этапе подготовки и хранения тестовых сценариев разрабатываются и описываются сценарии, представляющие собой последовательность действий, условий выполнения и критериев успешного прохождения теста. Сценарии создаются специалистами с использованием скриптовых языков программирования, таких как Python (например, в *MagicDAQ*), сценариев Robot Framework (в *PHiLIP*) и других средств. После разработки сценарии сохраняются в базе данных или репозитории для последующего использования управляющим модулем или системами непрерывной интеграции (например, Jenkins).

Планирование и запуск тестовых сценариев включает выбор необходимого набора тестов, определение последовательности их выполнения, синхронизацию и инициирование процесса тестирования. Запуск может осуществляться оператором через интерфейс управляющего модуля или автоматически из внешней системы непрерывной интеграции, как в случае с *PHiLIP*, использующим Jenkins.

Передача тестовых сценариев на исполнительный модуль в рассмотренных системах осуществляется через локальную сеть (например,

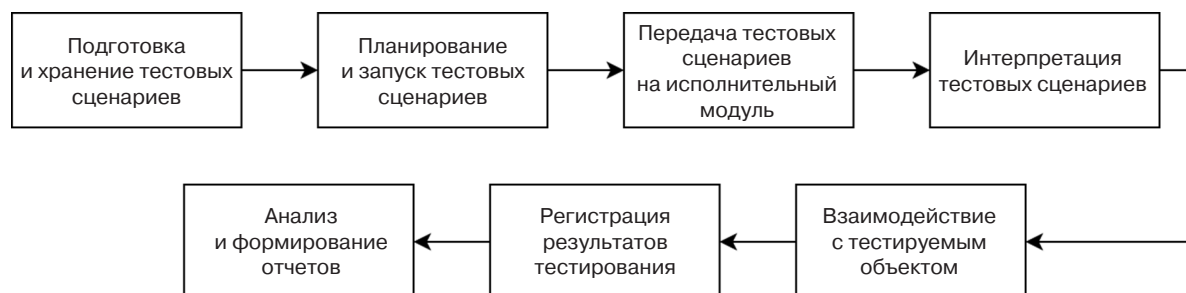


Рис. 7. Жизненный цикл тестового сценария

PHiLiP) или физические интерфейсы, такие как USB (*NI TestStand*, *MagicDAQ*, *KEOLABS ContactLAB*) и Ethernet (*KEOLABS ContactLAB*). При этом в проанализированных решениях не уточняется, применяются ли какие-либо механизмы шифрования или иные меры защиты передаваемых данных.

На этапе интерпретации тестовых сценариев происходит обработка сценария в среде исполнения, где логика теста преобразуется в конкретные команды для управления физическими интерфейсами. В зависимости от системы это может быть движок *TestStand*, Python-интерпретатор (в *MagicDAQ*), среда *Robot Framework* (в *PHiLiP*) или встроенная среда *SCRIPTIS* (в *KEOLABS ContactLAB*). Такой подход позволяет абстрагировать логику теста от аппаратной реализации.

Взаимодействие с тестируемым объектом осуществляется исполнительным модулем, который управляет физическими интерфейсами (SPI, I2C, UART, ISO 7816 и др.) и передает сигналы и команды непосредственно к тестируемому устройству. Например, в *PHiLiP* для этого используется отдельный интерфейсный модуль, взаимодействующий с Raspberry Pi и зависящий от него как управляющего модуля.

Регистрация результатов тестирования заключается в фиксации данных, полученных в ходе теста: откликов устройства, сигналов, временных меток, статусов и измеренных значений. Эти данные могут храниться локально на исполнительном модуле или сразу передаваться на управляющий модуль для последующего анализа.

На завершающем этапе – анализе и формировании отчетов – проводится обработка зарегистрированных данных, вычисление критериев успешного прохождения тест-кейса, формирование отчетов для операторов или автоматическая передача результатов во внешние системы анализа и управления качеством.

Анализ существующих платформ тестирования устройств интернета вещей и выделенных типовых процессов показал, что они обладают рядом ограничений, все рассмотренные решения объединяет ключевое ограничение – отсутствие механизма защищенного исполнения тестовых сценариев. Сценарии тестирования либо исполняются локально, либо доставляются вручную или через инфраструктуру непрерывной интеграции без явного использования криптографической защиты. Также многие инструменты являются локальными и не имеют поддержки удаленных исполнительных модулей. В современных условиях, где тестирование часто осуществляется в недоверенной среде и требует автономной работы исполнительных модулей, необходимо обеспечить возможность работы

проведения тестов без риска вмешательства или конфликта.

Таким образом, необходимо разработать новую архитектуру тестирования, которая устранит выявленные недостатки и обеспечит необходимый уровень безопасности и масштабируемости при тестировании устройств интернета вещей.

4. ПРЕДЛАГАЕМАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Предлагаемая архитектура представляет собой распределенную сеть тестирования устройств интернета вещей, в которой несколько исполнительных модулей взаимодействуют с управляющим модулем и обмениваются зашифрованными тестовыми сценариями. Архитектура представлена на рис. 8 и включает в себя следующие ключевые компоненты:

- управляющий модуль – отвечает за координацию распределенных исполнительных модулей, хранение тестовых сценариев;
- исполнительные модули – автономные узлы, физически подключенные к тестируемым устройствам. Модули выполняют полученные от управляющих модулей тестовые сценарии, регистрируют результаты и взаимодействуют с тестируемым объектом через подключенные интерфейсы. Каждая исполнительная станция содержит встроенную изолированную среду исполнения, в которой интерпретируются полученные от сервера сценарии тестирования;
- тестируемые устройства – подключенные к исполнительным модулям реальные устройства интернета вещей, тестируемые по физическим интерфейсам. Каждая испытательная станция подключается к тестируемому устройству через один из интерфейсов (SPI, I2C, UART и др.). Эти подключения в предлагаемой архитектуре обозначаются как каналы, каждый из которых представляет собой логически независимую единицу управления входными и выходными сигналами. Канал соответствует определенному типу интерфейса или протоколу взаимодействия.

Процесс тестирования начинается с того, что оператор инициирует выполнение сценария через управляющий модуль. Сценарий передается на исполнительный модуль по защищенному каналу, где исполняется в изолированной среде, формирующей команды для взаимодействия с интерфейсами тестируемого устройства. Результаты тестирования в зашифрованном виде пересылаются обратно на управляющий модуль для последующего анализа.

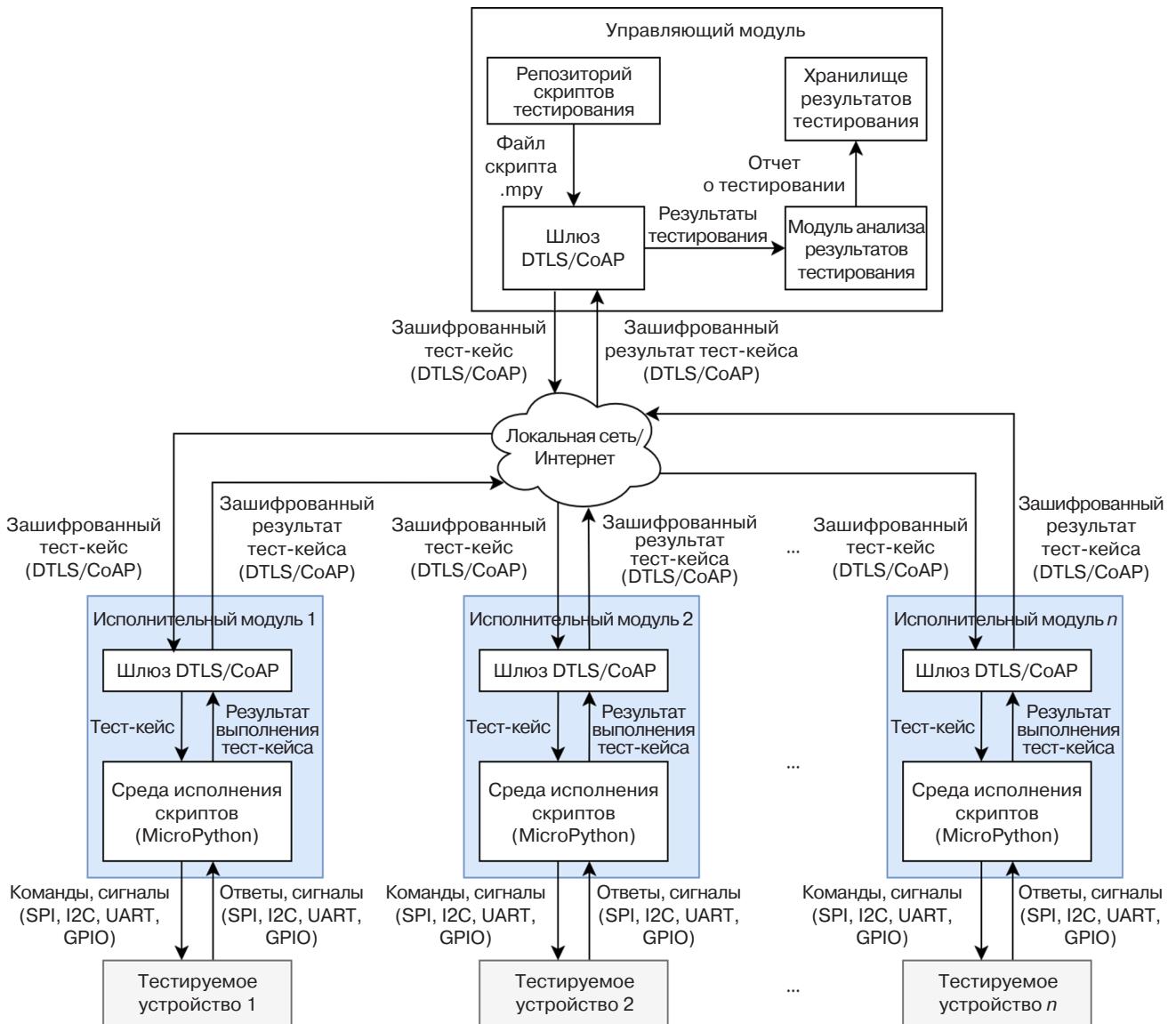


Рис. 8. Архитектура системы тестирования

При проектировании архитектуры особое внимание уделялось защите логики тестирования и снижению рисков, возникающих при эксплуатации в потенциально недоверенной среде. Как показано в исследованиях [13, 14], этапы жизненного цикла устройств сопровождаются угрозами несанкционированного доступа к программному обеспечению и утечки сценариев тестирования, а сами микроконтроллеры могут выступать как источником, так и объектом атак. Учитывая эти угрозы, архитектура системы предусматривает применение комплекса мер защиты на разных этапах жизненного цикла тестовых сценариев.

Для обеспечения конфиденциальности и целостности при передаче тестовых сценариев, а также при получении результатов тестирования используется протокол DTLS. Применение DTLS позволяет

обеспечить защиту данных при работе в недоверенных сетях, что особенно важно для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами [15].

Исполнение сценариев тестирования осуществляется в изолированной среде MicroPython¹⁸. Такая изоляция обеспечивает безопасное выполнение тестовых сценариев за счет компартиментализации и ограничения доступа к ресурсам [16].

Система поддерживает масштабируемость за счет подключения новых исполнительных модулей, каждый из которых работает автономно. Это обеспечивает параллельное выполнение тестов и исключает единую точку отказа.

¹⁸ Micropython. <https://micropython.org/>. Дата обращения 07.07.2025. / Accessed July 07, 2025.

В таблице приведены характеристики существующих и предложенного архитектурных решений. Как видно из таблицы, большинство существующих систем характеризуется централизованной архитектурой, ограниченными возможностями масштабирования и отсутствием механизмов защиты. Предлагаемое решение отличается распределенной архитектурой сети исполнительных модулей, применением изолированной среды выполнения и реализацией механизмов шифрования и аутентификации. Такой подход гарантирует не только эффективное масштабирование системы, но и существенно повышает уровень защиты тестовой логики.

Предлагаемое решение расширяет и усиливает отдельные процессы жизненного цикла тестового сценария. Рассмотрим ключевые особенности и отличия от других решений:

- Передача тестовых сценариев на исполнительный модуль. В отличие от аналогов, где передача осуществляется по USB/Ethernet (*NI TestStand*, *MagicDAQ*, *KEOLABS ContactLAB*) или локальной сети (*PHiLIP*) без использования механизмов защиты передачи данных, в предлагаемом решении сценарии передаются с управляющего модуля на исполнительные модули в зашифрованном виде с использованием протокола DTLS. Это позволяет обеспечить конфиденциальность и целостность тестовых сценариев даже при эксплуатации в потенциально недоверенной сети.

- Интерпретация тестовых сценариев. Сценарии описываются в виде Python-скриптов и выполняются на виртуальной машине MicroPython на исполнительном модуле, изолированном от основной ОС. Такая изоляция не предусматривается в рассмотренных ранее решениях (*NI TestStand*, *MagicDAQ*), где исполнение происходит в общей пользовательской среде, что создает риск вмешательства в логику тестирования.
- Регистрация результатов тестирования. Во многих текущих решениях результаты тестирования остаются локальными (*KEOLABS ContactLAB*) или обрабатываются вручную (*MagicDAQ*), без единого централизованного анализа. Предлагаемая архитектура предусматривает отправку зашифрованных отчетов от модулей в управляющий сервер.

Эффективность и работоспособность предложенной архитектуры подтверждены в ходе интеграционных испытаний разработанной системы тестирования функционирования устройств. Испытания проводились на экспериментальном стенде, включающем управляющий модуль, несколько исполнительных модулей и тестируемое устройство. Управляющий модуль был реализован на ПК, а исполнительные модули – на платах SE-Discovery-GD32F427 (производитель – GigaDevice Semiconductor Inc., Китай) со встроенным программным обеспечением и средой MicroPython. Взаимодействие между компонентами осуществлялось по защищенным сетевым каналам, реализованным в рамках локальной сети,

Таблица. Сопоставление характеристик существующих и предложенного решения

Характеристика	<i>NI TestStand</i>	<i>MagicDAQ</i>	<i>PHiLIP</i>	<i>KEOLABS</i>	Предлагаемое решение
Тип архитектуры	Централизованная	Централизованная	Распределенная	Централизованная	Распределенная
Среда исполнения	ПК	ПК	Исполнительный модуль	ПК	Исполнительный модуль
Масштабируемость	Локальная сеть (удаленный запуск через CI)	Ограничена количеством портов USB	Высокая (добавление узлов Raspberry Pi)	Ограничено ручным развертыванием	Высокая (добавление исполнительных модулей)
Изоляция исполнения	ОС	ОС (Python)	Robot Framework	<i>SCRIPTIS</i>	MicroPython
Механизмы защиты	–	–	Не указано	–	DTLS
Удаленное управление	Да (CI)	Нет	Да (CI)	Нет	Да (управляющий модуль)
Область применения	Общие тесты электронных устройств	Общие тесты электронных устройств	API встроенных ОС	Смарт-карты, NFC	Устройства интернета вещей, интерфейсы микроконтроллера

при этом архитектура допускает возможность удаленного взаимодействия между модулями при подключении к сети Интернет. В ходе испытаний проверялись ключевые функции системы: защищенная передача тестовых сценариев и результатов выполнения, а также корректное функционирование виртуальной машины исполнительного модуля. Все тестовые сценарии завершились успешно, что подтвердило работоспособность и эффективность предложенной архитектуры.

Разработанное решение применяется для тестирования смарт-карт и аппаратных токенов, включая проверку корректности выполнения апплетов. В ходе испытаний моделировались сбои питания и нестабильность интерфейсов связи. Один исполнительный модуль управлял подачей питания на тестируемое устройство, а другой обеспечивал обмен с тестируемым устройством, что позволило воспроизвести реальные условия эксплуатации и подтвердить устойчивость системы к нештатным ситуациям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена новая архитектура распределенной системы тестирования устройств интернета вещей, разработанная с учетом угроз эксплуатации в недоверенной среде. Проведенный анализ показал, что существующие системы тестирования устройств имеют ограниченную масштабируемость и не обеспечивают защищенной передачи и исполнения тестовых сценариев. Предложенная архитектура тестирования решает эти задачи за счет внедрения мер безопасности. Использование изолированных виртуальных сред исполнения и зашифрованных каналов передачи защищает тестовые сценарии от несанкционированного доступа или подмены.

Таким образом, ключевые преимущества предлагаемой архитектуры тестирования – безопасность (шифрование, изоляция логики), масштабируемость (добавление узлов без изменения архитектуры) – делают ее подходящим решением для тестирования устройств интернета вещей в потенциально недоверенной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков О.Н., Беляков Д.С., Калинин Е.О. Использование технологии ePKI для безопасного обновления встроенного программного обеспечения доверенных программно-аппаратных комплексов. *Безопасность информационных технологий*. 2025;32(2):152–177. <https://doi.org/10.26583/bit.2025.2.12>
2. Venugopal M., Nanda M., Anand G., Chandana Voora H. An integrated Hardware/Software Verification and Validation methodology for Signal Processing Systems. *ITM Web Conf.* 2022;50:02001. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20225002001>
3. Bures M., Cerny T., Ahmed B.S. Internet of Things: Current Challenges in the Quality Assurance and Testing Methods. *arXiv*. arXiv:1805.01241. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.01241>
4. Mazhar T., Talpur D.B., Shloul T.A., Ghadi Y.Y., Haq I., Ullah I. Analysis of IoT Security Challenges and its Solutions Using Artificial Intelligence. *Brain Sciences*. 2023;13(4):683. <https://doi.org/10.3390/brainsci13040683>
5. Minani J.B., Sabir F., Moha N., Guéhéneuc Y.G. A Multimethod Study of Internet of Things Systems Testing in Industry. *IEEE Internet Things J.* 2024;11(1):1662–1684. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2023.3291233>
6. Папуловская Н.В., Изотов И.Н., Блиничкин Д.Ю., Катаев А.Ю. Разработка ядра платформы автоматизированного тестирования устройств интернета вещей. *Int. J. Open Inf. Technol.* 2021;9(6):38–45. <https://elibrary.ru/ybxvtg>
7. Castelo Branco K.D.S., Dantas V.L.L., Carvalho L.M. Interoperability Testing Guide for the Internet of Things. In: *Proceedings of the 30th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia 2024)*. (Sociedade Brasileira de Computação). 2024. P. 188–196. <https://doi.org/10.5753/webmedia.2024.242058>
8. Weiss K., Rottleuthner M., Schmidt T.C., Wählich M. PHiLIP on the HiL: Automated Multi-Platform OS Testing with External Reference Devices. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst. (TECS)*. 2021;20(5s):1–26. <https://doi.org/10.1145/3477040>
9. Behnke I., Thamsen L., Kao O. Héctor: A Framework for Testing IoT Applications Across Heterogeneous Edge and Cloud Testbeds. In: *Proceedings of the 12th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing Companion*. ACM; 2019. P. 15–20. <https://doi.org/10.1145/3368235.3368832>
10. Ziegler S., Fdida S., Viho C., Watteyne T. F-Interop – Online Platform of Interoperability and Performance Tests for the Internet of Things. In: Mitton N., Chaouchi H., Noel T., Watteyne T., Gabillon A., Capolsini P. (Eds.). *Interoperability, Safety and Security in IoT. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Springer; 2017. V. 190. P. 49–55. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-52727-7_7. Accessed July 07, 2025.
11. Olianias D., Leotta M., Ricca F. MATTER: A tool for generating end-to-end IoT test scripts. *Software Qual. J.* 2021;30(2):389–423. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11219-021-09565-y>. Accessed July 07, 2025.
12. Schieferdecker I., Kretschmann S., Rennoch A., Wagner M. IoT-Testware – An Eclipse Project. In: *2017 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)*. IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/QRS.2017.59>
13. Беляков Д.С., Калинин Е.О., Конев А.А., Шелупанов А.А., Мицель А.А. Модели жизненного цикла и угрозы безопасности микросхемы во время ее разработки и эксплуатации. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Доклады ТУСУР)*. 2023;26(1):76–81. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-1-76-81>
14. Конев А.А. Модель угроз безопасности защищенного микроконтроллера и обрабатываемой им информации. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Доклады ТУСУР)*. 2022;25(4):80–87. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2022-25-4-80-87>

15. Restuccia G., Tschofenig H., Baccelli E. Low-Power IoT Communication Security: On the Performance of DTLS and TLS 1.3. In: *Proceedings 2020 9th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN)*. <https://doi.org/10.23919/PEMWN50727.2020.9293085>
16. Lowther D., Jacob D., Trevor J., Singer J. Secure Scripting with CHERIoT MicroPython. In: *Proceedings of the 34th ACM SIGPLAN International Conference on Compiler Construction*. ACM; 2025. P. 180–191. <https://doi.org/10.1145/3708493.3712694>

REFERENCES

1. Dyakov O.N., Belyakov D.S., Kalinin E.O. Using ePKI technology to securely update of embedded software of trusted hardware and software system. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = IT Security (Russia)*. 2025;32(2):152–177 (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/bit.2025.2.12>
2. Venugopal M., Nanda M., Anand G., Chandana Voora H. An integrated Hardware/Software Verification and Validation methodology for Signal Processing Systems. *ITM Web Conf.* 2022;50:02001. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20225002001>
3. Bures M., Cerny T., Ahmed B.S. Internet of Things: Current Challenges in the Quality Assurance and Testing Methods. *arXiv*. arXiv:1805.01241. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.01241>
4. Mazhar T., Talpur D.B., Shloul T.A., Ghadi Y.Y., Haq I., Ullah I. Analysis of IoT Security Challenges and its Solutions Using Artificial Intelligence. *Brain Sciences*. 2023;13(4):683. <https://doi.org/10.3390/brainsci13040683>
5. Minani J.B., Sabir F., Moha N., Guéhéneuc Y.G. A Multimethod Study of Internet of Things Systems Testing in Industry. *IEEE Internet Things J.* 2024;11(1):1662–1684. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3291233>
6. Papulovskaya N.V., Izotov I.N., Blinichkin D.Y., Kataev A.Y. Core Platform Development for IoT-devices Automated Testing. *Int. J. Open Inf. Technol.* 2021;9(6):38–45 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ybxvtg>
7. Castelo Branco K.D.S., Dantas V.L.L., Carvalho L.M. Interoperability Testing Guide for the Internet of Things. In: *Proceedings of the 30th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia 2024)*. (Sociedade Brasileira de Computação). 2024. P. 188–196. <https://doi.org/10.5753/webmedia.2024.242058>
8. Weiss K., Rottleuthner M., Schmidt T.C., Wählisch M. PHiLIP on the HiL: Automated Multi-Platform OS Testing with External Reference Devices. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst. (TECS)*. 2021;20(5s):1–26. <https://doi.org/10.1145/3477040>
9. Behnke I., Thamsen L., Kao O. Héctor: A Framework for Testing IoT Applications Across Heterogeneous Edge and Cloud Testbeds. In: *Proceedings of the 12th IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing Companion*. ACM; 2019. P. 15–20. <https://doi.org/10.1145/3368235.3368832>
10. Ziegler S., Fdida S., Viho C., Watteyne T. F-Interop – Online Platform of Interoperability and Performance Tests for the Internet of Things. In: Mitton N., Chaouchi H., Noel T., Watteyne T., Gabillon A., Capolsini P. (Eds.). *Interoperability, Safety and Security in IoT. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Springer; 2017. V. 190. P. 49–55. Available from URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-52727-7_7. Accessed July 07, 2025.
11. Olianias D., Leotta M., Ricca F. MATTER: A tool for generating end-to-end IoT test scripts. *Software Qual. J.* 2021;30(2): 389–423. Available from URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11219-021-09565-y>. Accessed July 07, 2025.
12. Schieferdecker I., Kretzschmann S., Rennoch A., Wagner M. IoT-Testware – An Eclipse Project. In: *2017 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)*. IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/QRS.2017.59>
13. Belyakov D.S., Kalinin E.O., Konev A.A., Shelupanov A.A., Mitsel A.A. Life-cycle models and security threats to the microchip during its development and exploitation. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki (Doklady TUSUR) = Proceedings of TUSUR University*. 2023;26(1):76–81 (in Russ.). <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2023-26-1-76-81>
14. Konev A.A. Security threat model for protected microcontroller and the information it processes. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki (Doklady TUSUR) = Proceedings of TUSUR University*. 2022;25(4):80–87 (in Russ.). <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2022-25-4-80-87>
15. Restuccia G., Tschofenig H., Baccelli E. Low-Power IoT Communication Security: On the Performance of DTLS and TLS 1.3. In: *Proceedings 2020 9th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN)*. <https://doi.org/10.23919/PEMWN50727.2020.9293085>
16. Lowther D., Jacob D., Trevor J., Singer J. Secure Scripting with CHERIoT MicroPython. In: *Proceedings of the 34th ACM SIGPLAN International Conference on Compiler Construction*. ACM; 2025. P. 180–191. <https://doi.org/10.1145/3708493.3712694>

Об авторе

Беляков Данила Сергеевич, старший преподаватель, кафедра комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем, факультет безопасности, ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (634050, Россия, Томск, пр-т Ленина, д. 40). E-mail: cauze4concern@yandex.ru. Scopus Author ID 57359476400, ResearcherID AAQ-4613-2021, SPIN-код РИНЦ 3368-8751, <https://orcid.org/0000-0002-6111-455X>

About the Author

Danila S. Belyakov, Senior Lecturer, Department of Complex Information Security of Computer Systems, Faculty of Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (40, Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia). E-mail: cauze4concern@yandex.ru. Scopus Author ID 57359476400, ResearcherID AAQ-4613-2021, RSCI SPIN-code 3368-8751, <https://orcid.org/0000-0002-6111-455X>

УДК 004.2

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-29-41>

EDN XHLRAX



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

О проектировании гетерогенных вычислительных систем с аппаратным ускорением массово-параллельной потоковой обработки данных

А.С. Зуев[@], П.Н. Советов, И.Е. Тарасов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: zuev_a@mirea.ru

• Поступила: 09.06.2025 • Доработана: 23.09.2025 • Принята к опубликованию: 05.02.2026

Резюме

Цели. Необходимость ускорения вычислений и достижения высоких показателей энергоэффективности приводит к расширению сфер использования специализированных гетерогенных вычислительных систем, имеющих в своем составе аппаратные ускорители с массовым параллелизмом вычислений. Целью настоящей работы является создание методики анализа и оценки вариантов реализации аппаратных ускорителей для задач массово-параллельной потоковой обработки данных, отражающей все направления совершенствования характеристик применяемых аппаратных ускорителей.

Методы. Используются методы проектирования и моделирования цифровых систем.

Результаты. Предложен метод сравнительной оценки эффективности архитектуры гетерогенной вычислительной системы на основе аппаратных ускорителей с массовым параллелизмом вычислений, выполняемых независимо программируемыми узлами. Введен коэффициент ускорения вычислений, объединяющий три направления совершенствования характеристик применяемых аппаратных ускорителей – математическое обеспечение и микроархитектура, инструментарий проектирования, технологии изготовления (литография). Предложена основанная на решении оптимизационной задачи методика анализа и оценки вариантов реализации применяемых аппаратных ускорителей.

Выводы. Полученные авторами формулы расчета коэффициента ускорения вычислений и пропускной способности совокупности аппаратных ускорителей учитывают многоканальную и поблочную массово-параллельную обработку потоков данных. В отличие от известных подходов к поиску архитектурных решений, предлагаемая оценка вариантов реализации аппаратных ускорителей может быть проведена на самых ранних этапах проектирования с учетом версий алгоритма и альтернатив их реализации, влияющих на оптимизацию аппаратной архитектуры. Предложенная методика анализа и оценки вариантов реализации аппаратных ускорителей может применяться при разработке технических заданий на их изготовление, при их проектировании в соответствии с заданными требованиями, для обоснования решений относительно их конфигурации, а также при составлении заданий на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы с целью достижения целевых значений характеристик для конкретных задач массово-параллельной потоковой обработки данных и функциональных возможностей систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: процессор, аппаратный ускоритель, сопроцессор, спецпроцессор, архитектура, компилятор

Для цитирования: Зув А.С., Советов П.Н., Тарасов И.Е. О проектировании гетерогенных вычислительных систем с аппаратным ускорением массово-параллельной потоковой обработки данных. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):29–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-29-41>, <https://www.elibrary.ru/XHLRAX>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Heterogeneous computing systems with hardware acceleration of massively parallel stream processing design

Andrey S. Zuev[@], Peter N. Sovietov, Ilya E. Tarasov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: zuev_a@mirea.ru

• Submitted: 09.06.2025 • Revised: 23.09.2025 • Accepted: 05.02.2026

Abstract

Objectives. The growing demand for higher computational performance and energy efficiency has motivated the increasing adoption of specialized heterogeneous computing systems incorporating hardware accelerators with massive parallelism. This paper aims to develop a methodology for the analysis and evaluation of hardware accelerator implementation strategies for large-scale parallel stream data processing which systematically captures all major directions of performance improvement.

Methods. The study employs established techniques of digital system design and modeling.

Results. A comparative evaluation method is introduced to assess the efficiency of heterogeneous computing architectures based on massively parallel hardware accelerators composed of independently programmable nodes. A computational acceleration ratio is defined which consolidates three key dimensions of accelerator improvement: algorithmic support and microarchitecture; design automation tools; and fabrication technologies (lithography). Furthermore, the study proposes an optimization-based methodology for the systematic analysis and evaluation of the alternatives for hardware accelerator implementation.

Conclusions. The expressions derived herein for calculating the computational acceleration ratio and the aggregate throughput of hardware accelerators account for both multichannel and block-based massively parallel data stream processing. In contrast to conventional architectural exploration approaches, the evaluation method proposed herein enables hardware accelerator design alternatives to be assessed at the earliest stages of the design cycle. This incorporates variations in algorithmic versions and implementation strategies which influence hardware architecture optimization. The proposed methodology for analyzing and evaluating implementation options for hardware accelerators can be used to develop technical specifications for their manufacture, design them according to specified requirements, and justify configuration decisions. It can also support research and development assignments to achieve target characteristics for certain domain-specific tasks of massively parallel stream data processing and CAD capabilities.

Keywords: processor, hardware accelerator, coprocessor, special-purpose processor, architecture, compiler

For citation: Zuev A.S., Sovietov P.N., Tarasov I.E. Heterogeneous computing systems with hardware acceleration of massively parallel stream processing design. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):29–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-29-41>, <https://www.elibrary.ru/XHLRAX>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование высокопроизводительных вычислительных систем в настоящее время основывается на двух важных направлениях – параллельных архитектурах и специализации отдельных вычислительных узлов. Широко распространенным примером является сочетание процессоров общего назначения и графических ускорителей, где графические ускорители представляют собой микросхемы с большим количеством специализированных вычислительных узлов, ориентированных на выполнение преобразований, характерных для построения изображений трехмерной графики. Подобные архитектурные решения с сочетанием универсальных и специализированных вычислительных подсистем применимы также для задач в сферах искусственного интеллекта, сетевой безопасности и анализа больших данных.

При разработке вычислительных систем с гетерогенной архитектурой необходимо решить комплекс взаимосвязанных задач, включающий:

- разработку программной модели и прототипов специализированных компиляторов для выбранной предметно-ориентированной задачи;
- разработку архитектуры и основных компонентов вычислительных устройств на уровне регистровых передач;
- реализацию аппаратных подсистем в выбранном технологическом базисе, в качестве которого могут выступать как программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), так и вновь разрабатываемые сверхбольшие интегральные схемы (СБИС).

Важной задачей, решение которой обуславливает показатели качества вычислительной системы, является комплексная оптимизация по устанавливаемым критериям. В зависимости от назначения системы оптимизация может проводиться как по абсолютным (энергопотребление, себестоимость, производительность и т.д.), так и по производным показателям (например, удельное энергопотребление или стоимость на единицу производительности). С учетом широкого диапазона характеристик, определяемых имеющимися в микроэлектронной отрасли поколениями технологических процессов, необходимо производить как взаимную оптимизацию программной модели и архитектурных решений, так и согласование схемотехнических подходов с возможностями

технологического базиса. Следовательно, можно расширить подход, обозначаемый как «совместное проектирование аппаратного и программного обеспечения» (hardware & software co-design), включив в него совместную оптимизацию с технологическим уровнем проектирования компонентов устройства.

В настоящее время существует ряд общих положений, описывающих ситуацию и тенденции в области микроэлектроники. В то время как закон Мура указывает на технико-экономическую сторону процесса роста производительности вычислений, закон масштабирования размеров транзистора, сформулированный Деннардом [1], на ранних стадиях развития микроэлектроники объяснял этот рост экстенсивным процессом повышения плотности компонентов на кристалле и уменьшением задержки распространения сигнала. Эти факторы обусловили существенный рост тактовой частоты процессоров в период 1980–2000 гг., когда для массовых процессоров настольных компьютеров наблюдался переход от 4 МГц в начале 1980-х гг. до 4 ГГц у Intel Pentium 4.

При этом для многих технических характеристик цифровых микросхем наблюдается эффект насыщения по мере перехода к новым поколениям технологических процессов из производства. Сравнительные характеристики некоторых параметров поколений технологических процессов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики некоторых параметров поколений технологических процессов

Год	2013	2015	2017	2019	2021
Обозначение	16/14	10	7	5	3
Шаг координатной сетки (half pitch), нм	40	32	25	20	16
Ширина транзистора FinFET ¹ , нм	7.6	7.2	6.8	6.4	6.1
Число логических вентилях 4И на кв. мм, млн	4	6.4	10.1	16.1	25.5
Длина затвора транзистора, нм	20	17	14	12	10

¹ Fin field-effect transistor – МОП-транзистор (металл-оксид-полупроводник) с трехмерной структурой. [A FinFET (fin field-effect transistor) is a type of MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) with a three-dimensional structure.]

Из приведенных сведений видно, что уменьшение размеров транзистора приостановилось, при этом основным фактором улучшения характеристик выпускаемых микросхем становится повышение плотности компонентов на единицу площади полупроводникового кристалла. Таким образом, дальнейшее улучшение транзисторов может происходить не в соответствии с законом Деннарда, а по мере перехода к новым материалам или изменения конструкции затвора (например, FinFET [2], GAAFET² [3], MBCFET³ [4] и т.д.). В связи с этим эволюция вычислительных устройств претерпевала ряд изменений, отражающих особенности новых поколений технологических процессов производства интегральных микросхем.

В работе Паттерсона и Хеннесси [5] дается исторический обзор основных тенденций проектирования процессоров. В частности, отмечается, что переход к микросхемам высокой степени интеграции позволил в период 1980–1990 гг. перейти от простых процессорных ядер к конвейеризованным архитектурам типа RISC⁴, причем вплоть до технологических норм 90–65 нм глубина конвейера возрастала. Прекращение действия закона Деннарда с одновременным увеличением количества компонентов на одном кристалле позволило перейти к многоядерным процессорным устройствам, что дало возможность увеличения общей производительности процессора не за счет роста его тактовой частоты, а за счет параллельной работы нескольких ядер.

В то же время, рост производительности вычислений в параллельной архитектуре ограничивается законом Амдала [6], который учитывает зависимость от данных в исполняемом алгоритме. В настоящее время ограничения закона Амдала для многих применений (в частности, настольных и серверных) не являются критичными вследствие того, что независимо выполняемые задачи не имеют зависимости от данных, и, таким образом, могут в полной мере использовать имеющиеся в наличии процессорные ядра.

Необходимость ускорения вычислений в пределах одной задачи требует применения соответствующих архитектурных решений, не сводящихся только к увеличению количества параллельно работающих

вычислительных узлов. В качестве важного фактора роста производительности вычислений может рассматриваться глубокая специализация вычислительного узла, в т.ч. специализация его тракта данных и подсистемы памяти, применение системы с гетерогенной архитектурой, состоящей из комбинации процессоров общего назначения и специализированных узлов, ускоряющих вычисление определенных алгоритмов или подклассов алгоритмов для типовых, многократно решаемых предметно-ориентированных задач.

Методика, предложенная в настоящей статье, позволяет организовать проектирование специализированных вычислительных устройств для работы в составе программно-аппаратных комплексов различного назначения. Особенностью методики является комплексное рассмотрение уровней проектирования от системной модели до топологической реализации с использованием обратных связей от расположенных ниже уровней проектирования, что позволяет проводить комплексную оптимизацию характеристик вычислительного устройства по устанавливаемым критериям. Предложены математические критерии эффективности ускорителя, основанные на введенном коэффициенте ускорения вычислений по сравнению с процессором общего назначения. Также сформулирована задача оптимизации архитектуры аппаратного ускорителя в виде задачи поиска в пространстве архитектурных вариантов.

В отличие от известных аналитических моделей, таких как Roofline [7] и LogCA [8], рассматриваемые в статье формулы расчета коэффициента ускорения вычислений и пропускной способности учитывают многоканальную и поблочную массово-параллельную обработку потоков данных.

В отличие от известных подходов к поиску в пространстве архитектурных вариантов [9] предложенная оценка вариантов реализации аппаратных ускорителей может быть проведена на самых ранних этапах проектирования. Она учитывает как специфику массово-параллельной потоковой обработки данных, так и возможность выбора среди различных вариантов ускоряемого алгоритма и его реализаций, с учетом которых происходит оптимизация аппаратной архитектуры.

Гетерогенные вычислительные системы на основе специализированных аппаратных ускорителей с массовым параллелизмом вычислений

На рис. 1 представлена интерпретация авторами работы Паттерсона и Хеннесси [5] в части тенденций изменения архитектуры процессорных систем.

² Gate-all-around field-effect transistor – транзистор, каналы в котором окружены затворами со всех четырех сторон. [A GAAFET (gate-all-around field-effect transistor) is a type of transistor where the channels are surrounded by gates on all four sides.]

³ Multi-bridge channel field-effect transistor – многоканальный полевой транзистор. [MBCFET is a multi-bridge channel field-effect transistor.]

⁴ Reduced instruction set computer – компьютерная архитектура с сокращенным набором команд. [RISC (reduced instruction set computer) is a computer architecture that has a reduced instruction set.]

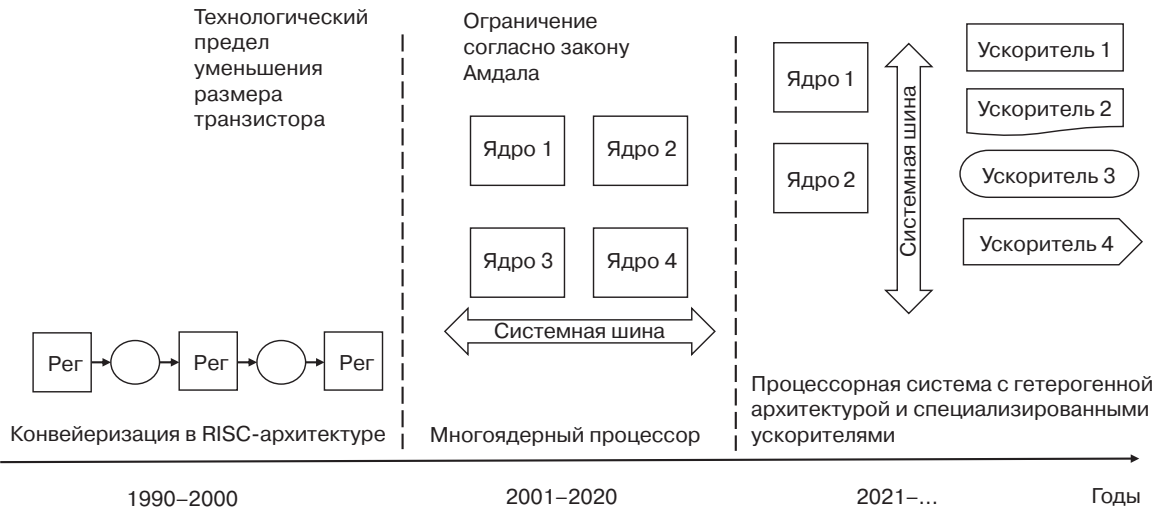


Рис. 1. Иллюстрация тенденций изменения архитектуры процессорных систем. Рег – регистр

Представленная иллюстрация предлагает вариант архитектурного решения для предложенного Паттерсоном и Хеннесси направления «предметно-ориентированных архитектур» (DSA, domain-specific architecture). Формально, специализация вычислительной системы может быть произведена множеством способов. В данной публикации авторами предложено и рассмотрено решение, предусматривающее сохранение процессора общего назначения (в т.ч. в многоядерном исполнении) и добавление специализированных ускорителей, работающих в составе системы в качестве независимых параллельно функционирующих с ним устройств.

Для конкретизации роли процессоров общего назначения и ускорителей можно рассмотреть диаграмму, представленную на рис. 2, где оси представляют сложность одной итерации вычислений в циклическом алгоритме и количество таких итераций, требуемых для решения задачи.

На рис. 2 можно видеть четыре основные зоны, соответствующие комбинации простых и сложных

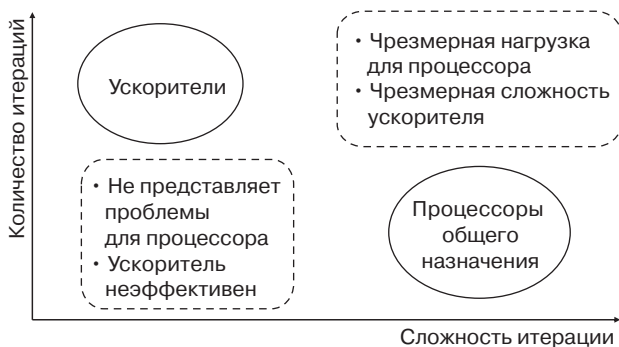


Рис. 2. Диаграмма соотношения сложности итераций и их количества с предпочтительными архитектурами вычислительных устройств

итераций (имеющих, в первую очередь, зависимости по данным, затрудняющие распараллеливание вычислений), а также их малого и большого количества. Простой случай в виде несложного алгоритма с небольшим количеством итераций (частным случаем является линейный алгоритм с единственной итерацией) не представляет сложности при его реализации на базе процессора общего назначения, поэтому создание специализированного ускорителя для такого случая нецелесообразно. При увеличении сложности алгоритма реализующее его вычислительное устройство должно обладать развитым набором функциональных узлов и достаточными ресурсами памяти для размещения относительно длинной последовательности команд. Также немаловажно, что сложные алгоритмы часто могут требовать коррекции в ходе эксплуатации системы (например, обновление протоколов работы устройства), поэтому выделение ключевой вычислительной подсистемы для ее аппаратной реализации в виде ускорителя в подобном случае является сложной задачей. При этом небольшое количество итераций такого алгоритма не создает существенной вычислительной нагрузки на процессор общего назначения.

Важным вопросом является интеграция ускорителя в состав вычислительной системы. Повышение степени интеграции цифровых микросхем привело к появлению эффекта «стены интерфейсов» [10], который проявляется в виде опережающего роста производительности вычислений по сравнению с производительностью внешних интерфейсов (подсистем ввода-вывода). На практике это означает, что размещение в ускорителе большого количества простых вычислительных узлов, требующих интенсивного обмена данными с процессором общего назначения, приведет к перегрузке интерфейсов обмена данными

и снижению итоговой производительности вычислений из-за невозможности обеспечить требуемый поток входных данных для ускорителей. В качестве примера можно привести эволюцию характеристик ПЛИС с распространенными архитектурами – FPGA⁵, APSoC⁶ и ACAP⁷, которые в настоящее время являются характерными представителями высокоинтегрированных цифровых систем, совмещающих подсистемы различного назначения. В табл. 2 приведены сравнительные характеристики производительности вычислительной и интерфейсной подсистем некоторых семейств ПЛИС производства компании AMD/Xilinx (США).

Таблица 2. Сравнительные характеристики производительности вычислительной и интерфейсной подсистем некоторых семейств ПЛИС AMD

Серия ПЛИС	Серия 7	UltraScale+	Versal
Норма технологического процесса, нм	28	16	7
Логических ячеек, тыс.	2000	8900	7350
Блоков цифровой обработки сигналов	3600	12288	14352
Суммарная производительность вычислений, трлн оп./с с данными int8	15	38.3	100
Суммарная производительность передачи данных, Тбит/с	2	4.1	17.6
Соотношение производительности вычислений и передачи данных	60	74	45

Из табл. 2 можно видеть, что между производительностью вычислений и передачи данных в целом сохраняется соотношение порядка 50–70. Это означает, что при эффективной загрузке вычислительных мощностей с переданными данными производится не менее 50–70 операций обработки. Данный диапазон значений является условным и не учитывает практические аспекты реализации операций, однако можно отметить, что чрезмерно простой ускоритель

⁵ Field-programmable gate array – программируемая пользователем вентильная матрица. [A field-programmable gate array is a user-programmable gate array.]

⁶ All programmable system-on-chip – тип интегральной схемы, программируемая система на чипе. [All programmable system-on-chip is a type of programmable integrated circuit.]

⁷ Adaptive compute acceleration platform.

снизит эффективность системы как таковой, поскольку каждая операция потребует интенсивного обмена данными между ускорителем и другими компонентами системы. Негативный сценарий использования ускорителя вычислений с ограничением по пропускной способности интерфейса показан на рис. 3.

Таким образом, на архитектурном уровне следует предпринимать усилия по обеспечению соответствующего уровня производительности вычислений, гарантирующего эффективное использование ресурсов ускорителя при заданной пропускной способности его интерфейсов. Варианты таких сценариев показаны на рис. 4.

Показанные варианты предусматривают, что ускоритель выполняет множество операций с передаваемыми данными. Вариант 1 – при реализации относительно сложного автономного алгоритма, выполняющего итерации вычислений без необходимости передачи постоянного потока данных. Вариант 2 – при параллельной обработке данных, в которой большое количество операций реализуется последовательно соединенными стадиями конвейерного вычислителя. Авторами рассматривается показанный на рис. 4 вариант 2 – гетерогенная вычислительная система с аппаратным ускорением массово-параллельной потоковой обработки данных.

Задачи и алгоритмы массово-параллельной потоковой обработки данных

Задачи потоковой обработки данных возникают в различных областях, к которым, в частности относятся: цифровая обработка сигналов, сжатие данных, криптография, аналитика реального времени и анализ сетевого трафика.

Потоковая обработка предполагает поэлементную обработку потенциально бесконечного потока данных $x_1, x_2, \dots, x_t, \dots$, где x_t – элемент, доступный для обработки в момент времени t . Элементы являются однотипными и могут представлять собой как отдельные биты или байты, так и сложноструктурированные сущности.

Для алгоритмов потоковой обработки характерно их выполнение за один проход, без возможности перейти к уже просмотренным или еще не обработанным элементам. Обработка осуществляется в условиях ограниченной локальной памяти с пространственной сложностью $O(1)$, не зависящей от количества элементов потока.

К основным характеристикам систем потоковой обработки относится пропускная способность $R = N/t_N$, где N – число элементов, а t_N – общее время их обработки. При этом $R \leq R_{\max}$, где R_{\max} представляет собой максимально допустимую пропускную

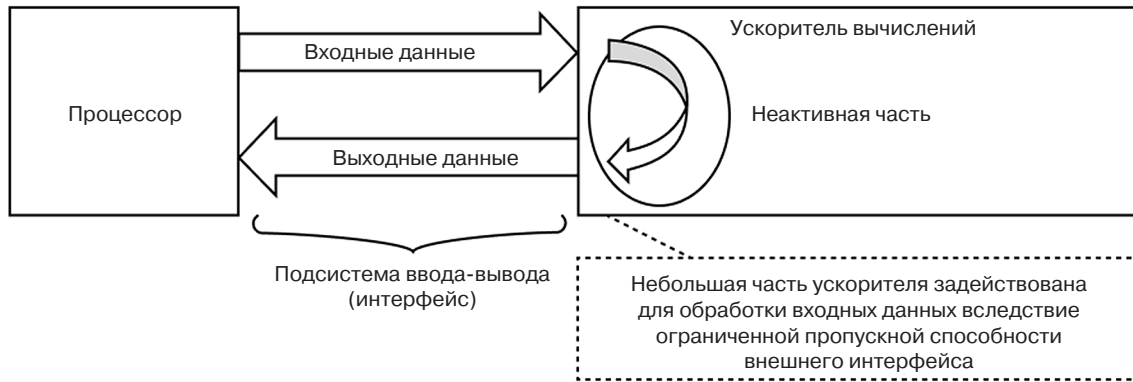


Рис. 3. Негативный сценарий использования ускорителя вычислений с ограничением пропускной способности подсистемы ввода-вывода (интерфейса)

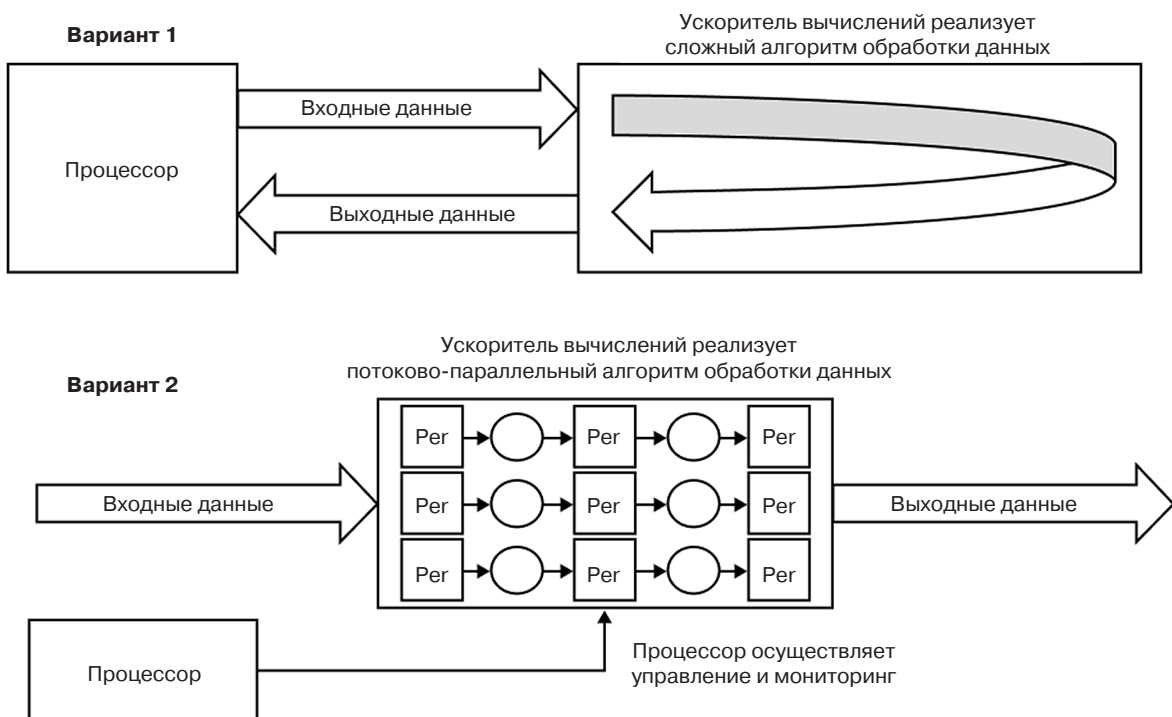


Рис. 4. Варианты сценариев использования ускорителя вычислений, эффективно использующего ограниченную пропускную способность интерфейсов (используется конвейеризация вычислений)

способность, ограниченную, в частности, возможностями подсистемы ввода-вывода. В условиях работы в реальном времени задержка на обработку одного элемента должна быть также ограничена: $L \leq L_{\max}$.

Аппаратное ускорение позволяет использовать в потоковой обработке данных параллелизм на различных уровнях. В частности, параллелизм уровня команд определяется, в первую очередь, интенсивностью вычислений, т.е. преобладанием вычислительных операций над операциями обращения к памяти при обработке элемента потока. Параллелизм задач (параллелизм каналов) возможен при условии обработки нескольких каналов одновременно.

Во многих случаях потоковый алгоритм необходимо модифицировать с учетом конкретной архитектуры аппаратного ускорителя. Например, если размер таблиц, используемых в реализуемом алгоритме, превышает размер локальной памяти аппаратного ускорителя, то таблицы потребуются заменить дополнительными вычислениями.

В литературе описаны аппаратные ускорители потоковой обработки данных для различных областей и предметно-ориентированных задач. Существуют, в частности, аппаратные ускорители для быстрой проверки принадлежности элемента множеству (фильтр Блума) [11] и задачи оценки числа различных элементов

в мультимножестве (HyperLogLog) [12]. Для ускорения работы различных алгоритмов на строках также спроектированы аппаратные ускорители: вычисление редакционного расстояния [13], поиск по регулярным выражениям [14], разбор формата JSON⁸ [15]. Вопросы аппаратного ускорения сжатия и декомпрессии данных описаны в [16]. В [17] описан аппаратный ускоритель, объединяющий декомпрессию данных с разбором формата JSON.

Важной областью для применения аппаратных ускорителей являются различные алгоритмы баз данных. В [18] описано аппаратное ускорение операций реляционной базы данных: выборки, проекции, соединения, сортировки и различных агрегатных функций. Аппаратное ускорение операции сопоставления с образцом для графовой базы данных предложено в [19]. Перспективным для аппаратного ускорения является направление потоковой аналитики. В частности, в [20] описаны основные алгоритмы из этой области, допускающие аппаратную реализацию. Существуют также подходы к потоковой обработке для ряда алгоритмов машинного обучения. На этой основе реализованы аппаратные ускорители для градиентного бустинга [21], а также для задач кластеризации [22].

Сравнительная оценка эффективности вычислительных систем потоковой обработки данных: с процессором общего назначения и с применением аппаратного ускорения

Количественная оценка эффективности ускорителя может быть проведена на основе сравнения T_{soft} – времени выполнения задачи с использованием только процессора общего назначения и T_{hard} – времени выполнения задачи с использованием ускорителя, т.е.:

$$K = \frac{T_{\text{soft}}}{T_{\text{hard}}}$$

При оценке времени выполнения программы удобно воспользоваться формулой, которая подробно прокомментирована в [23]:

$$\text{time} = \frac{\text{instructions}}{\text{program}} \cdot \frac{\text{cycles}}{\text{instruction}} \cdot \frac{T_{\text{period}}}{\text{cycle}}$$

В этой формуле отдельные множители, представленные в виде дробей, соответствуют характеристикам компилятора, микроархитектуры и технологического процесса:

⁸ JavaScript object notation – текстовый формат обмена данными, основанный на синтаксисе JavaScript. [JavaScript object notation is a text-based data exchange format based on JavaScript syntax.]

1. Количество инструкций (instructions) на одну итерацию программы определяется способностью компилятора порождать оптимизированный машинный код по показателю производительности.
2. Количество тактов (cycles) на инструкцию определяется микроархитектурой процессора.
3. Время выполнения одного такта (период тактового сигнала) – T_{period} в основном определяется технологическим процессом изготовления процессора.

Таким образом, общее время выполнения программы может быть улучшено различными способами, сочетания которых могут быть использованы в задачах проектирования специализированных ускорителей.

Для ускорителя, подключаемого к процессору с помощью одного из интерфейсов, необходимо также учитывать время T_{conf} его конфигурирования – передачи входных параметров задачи и приема результатов ее решения.

При условии, что одна и та же задача требует выполнения b итераций, отношение времени работы процессора общего назначения к времени работы ускорителя принимает вид:

$$K = \frac{bT_{\text{soft}}}{T_{\text{conf}} + bT_{\text{hard}}}$$

В данном виде формула не отражает наличия в ускорителе нескольких вычислительных узлов, которые могли бы работать параллельно. Под узлами потоковой обработки данных будем понимать количество одновременно выполняемых в ускорителе экземпляров алгоритма обработки данных. Например, в случае обработки потока данных с целью поиска по регулярным выражениям количество узлов потоковой обработки данных соответствует количеству регулярных выражений, по которым анализ каждого блока данных выполняется одновременно и параллельно.

Пусть t_{hard} – время выполнения алгоритма с использованием единственного узла аппаратного ускорителя. Если обозначить количество параллельно работающих узлов, задействованных в решении данной задачи, как p , то формула принимает вид:

$$K = \frac{bT_{\text{soft}}}{T_{\text{conf}} + bt_{\text{hard}}/p}$$

Значением T_{conf} можно пренебречь, т.к. вследствие потоковой обработки данных конфигурирование ускорителя производится однократно для продолжительных периодов его работы, в течение которых выполняется обработка большого (потенциально – бесконечного) количества однотипных блоков данных, и коэффициент ускорения вычислений стремится к:

$$K = \frac{pT_{\text{soft}}}{t_{\text{hard}}} = \frac{pn_{\text{soft}}f_{\text{hard}}}{n_{\text{hard}}f_{\text{soft}}}, \quad (1)$$

где n_{hard} , n_{soft} – количество тактов, требуемых ускорителю и процессору соответственно для решения задачи, а f_{hard} , f_{soft} – соответствующие тактовые частоты.

Формула (1) показывает, что аппаратное ускорение работы вычислительной системы в целом основано на двух факторах:

- увеличение количества параллельно работающих узлов;
- улучшение эффективности одного узла путем повышения его тактовой частоты и уменьшения количества тактов, требуемых для реализации задачи.

Методика разработки специализированных процессорных ядер была ранее рассмотрена в [24]. В ситуации, когда разработка специализированной электронной компонентной базы (ЭКБ) затруднена отсутствием доступа к современным технологическим процессам и необходимостью быстрой адаптации вновь разрабатываемых схем к технологическому базису, достижение высокой тактовой частоты ускорителя объективно затруднено. Поэтому соотношение частот аппаратного ускорителя и серийно выпускаемых процессоров общего назначения может быть невысоким (по сути, меньше 1). В связи с этим следует обращать особенное внимание на снижение количества тактов, требуемых аппаратному ускорителю для обработки одного блока данных, т.е. уменьшение параметра n_{hard} при одновременном сохранении достаточно высокой (в общем случае, без учета фактора энергопотребления – максимально возможной) тактовой частоты f_{hard} . Это может быть достигнуто с использованием специализированных параллельных алгоритмов и фаз оптимизирующего компилятора, учитывающих аппаратные особенности ускорителя.

Таким образом, предложенный авторами коэффициент ускорения вычислений (1) объединяет три направления совершенствования характеристик аппаратных ускорителей гетерогенных систем массово-параллельной потоковой обработки данных: математическое обеспечение и микроархитектура ускорителя (p и n_{hard}), инструментарий проектирования (система автоматизированного проектирования, САПР) и технологии изготовления (литография) ЭКБ (p и f_{hard}).

Для ускорителя с p узлами параллельной потоковой обработки данных, с учетом (1), время $T_{\text{hard}}(n)$ обработки n блоков данных может быть определено как

$$T_{\text{hard}}(n) = T_{\text{conf}} + n \cdot \max\left(T_{\text{block}}, \frac{T_{\text{soft}}}{K}\right), \quad (2)$$

где T_{block} – время приема-передачи очередного блока данных, которое определяется возможностями подсистемы ввода-вывода и поэтому не может быть сокращено; p – количество экземпляров алгоритма, параллельно обрабатывающих очередной блок данных.

В случае возможности реализации на одной микросхеме нескольких рассмотренных выше параллельно функционирующих ускорителей можно говорить о параллельной обработке C потоков блоков данных и считать итоговым вариантом ускорителя их данную совокупность. Тогда пропускная способность R_{hard} совокупности из C параллельно работающих ускорителей (с характеристикой $T_{\text{hard}}(n)$ по формуле (2)) имеет вид:

$$R_{\text{hard}} = \frac{Cn}{T_{\text{hard}}(n)} = \frac{C}{\frac{T_{\text{conf}}}{n} + \max\left(T_{\text{block}}, \frac{T_{\text{soft}}}{K}\right)} \approx \frac{C}{\max\left(T_{\text{block}}, \frac{T_{\text{soft}}}{K}\right)}.$$

Величина C ограничена числом физически доступных интерфейсов в реализуемой подсистеме ввода-вывода, а также спецификацией решаемой прикладной задачи. Таким образом, в процессе проектирования аппаратного ускорителя, помимо принятия решений о технологических процессах его изготовления и технических характеристиках, требуется одновременная разработка инструментальных средств, в частности, специализированного компилятора, который может использоваться для совместной оптимизации программно-аппаратного обеспечения.

Анализ и оценка вариантов реализации аппаратных ускорителей гетерогенных вычислительных систем массово-параллельной потоковой обработки данных

Изложенный в предыдущем разделе материал содержит описание метода оценки эффективности применения для массово-параллельной потоковой обработки данных процессора общего назначения относительно специализированного ускорителя, обладающего следующими характеристиками:

T_{block} – время приема-передачи блока данных, определяемое подсистемой ввода-вывода (вариантами реализации сопряжения ускорителя с вычислительной системой);

f_{hard} – тактовая частота, зависящая от доступных вариантов приобретения или изготовления ускорителя, фактически определяется возможностями инструментария его проектирования (САПР)

и технологий изготовления (ПЛИС или заказная микросхема);

n_{hard} – количество тактов, требуемых ускорителю (узлу потоковой обработки данных) для решения задачи, зависит от состава применяемых специализированных параллельных алгоритмов и фаз оптимизирующего компилятора, учитывающих аппаратные особенности ускорителя, фактически определяется вариантами математического обеспечения решения задачи ускорителем и его микроархитектурой;

p – количество параллельно работающих в составе ускорителя узлов потоковой обработки данных, задействованных в решении задачи.

Заметим, что доступные варианты значений f_{hard} определяются характеристиками доступных для применения ПЛИС и СБИС в случае приобретения готовой ЭКБ, а также вариантами их изготовления, т.е. доступными в производстве ЭКБ технологическими процессами и библиотеками стандартных ячеек.

При проектировании ускорителя к перечисленным выше характеристикам целесообразно добавить также следующие параметры:

T_{task} – время обработки одного блока данных ускорителем, определяемое требованиями технического задания (ТЗ);

C_{max} – максимально доступное число каналов подсистемы ввода-вывода;

C ($C \leq C_{\text{max}}$) – размещаемое на кристалле количество экземпляров ускорителя;

S ($S \leq S_{\text{max}}$) – площадь кристалла, ограниченная в его конкретном исполнении.

Конкретные значения некоторых из перечисленных выше параметров зависят от особенностей реализации решения задачи на ускорителе – от конкретного варианта соответствующего алгоритма обработки данных. Пусть $a_i, i = \overline{1, n}$ – множество альтернативных алгоритмов, т.е. вариантов реализации решения задачи на ускорителе, каждый из которых характеризуется следующим набором параметров:

n_{hard}^i – количество тактов, требуемых одному вычислительному узлу ускорителя для решения задачи;

P_i – максимально возможное количество параллельно работающих в составе ускорителя экземпляров алгоритма;

local_i – площадь кристалла, занимаемая объемом локальной памяти m_i ускорителя, требуемой для выполнения алгоритма a_i ;

alu_i – площадь кристалла, занимаемая одним узлом потоковой обработки данных;

glob_i – площадь кристалла, выделяемая для хранения данных, используемых всеми экземплярами алгоритма a_i (может быть константой, например для случая регулярных выражений, а также зависеть от пропускной способности подсистемы

ввода-вывода, требований к загрузке процессора общего назначения и т.п.).

Тогда $S_i = (\text{local}_i + \text{alu}_i)$ – площадь кристалла, выделяемая для одного узла потоковой обработки данных ускорителя, т.е. для функционирования одного экземпляра алгоритма a_i . Для ускорителя с p_i узлами потоковой обработки данных, реализующими отдельные экземпляры алгоритма a_i , требуемая площадь кристалла может быть рассчитана по формуле:

$$U_i = S_i p_i = (\text{local}_i + \text{alu}_i) p_i, p_i \leq P_i.$$

При размещении на кристалле C_i экземпляров ускорителя, каждый из которых реализует p_i экземпляров алгоритма a_i требуемая площадь S_i кристалла может быть определена следующим образом:

$$S_i = \text{glob}_i + U_i C_i = \text{glob}_i + S_i p_i C_i = \\ = \text{glob}_i + (\text{local}_i + \text{alu}_i) p_i C_i, p_i \leq P_i, S_i \leq S.$$

Формула (2) позволяет не только определить время $T_{\text{hard}}(n)$ обработки n блоков данных ускорителем с p узлами, но и обеспечивает возможность анализа и оценки вариантов его реализации, исходя из имеющихся (доступных) технологических возможностей. Определим ограничение на доступные значения характеристики быстродействия ускорителя – время T_{fix} обработки им одного блока данных:

$$T_{\text{fix}} = \min(T_{\text{block}}, T_{\text{task}}).$$

Время T_{fix} , определяемое возможностями подсистемы ввода-вывода или ТЗ на разработку ускорителя, можно считать однозначно детерминированным и задающим естественные ограничения на целесообразные комбинации его характеристик:

$$\frac{T_{\text{soft}}}{K} \approx T_{\text{fix}}. \quad (3)$$

Варианты реализации ускорителя, соответствующие условию (3) со знаком « $<$ », являются нецелесообразными, т.к. его избыточная эффективность будет ограничена возможностями подсистемы ввода-вывода. Варианты реализации ускорителя, соответствующие условию (3) со знаком « $>$ », не обеспечивают максимум производительности.

В качестве критерия оптимальности варианта реализации ускорителя с учетом соответствующего ТЗ варианта исполнения подсистемы ввода-вывода и исходя из имеющихся технологических возможностей может использоваться выражение

$$\left| \frac{T_{\text{soft}}}{K} - T_{\text{fix}} \right| \rightarrow \min,$$

которое с учетом (1) и возможностей реализации на ускорителе множества альтернативных алгоритмов $a_i, i = \overline{1, n}$ принимает следующий вид:

$$\left| \frac{n_{\text{hard}}^i}{p_i f_{\text{hard}}^i} - T_{\text{fix}} \right| \rightarrow \min. \quad (4)$$

С учетом того, что параметр f_{hard}^i может принимать различные значения (описываться вектором значений) может быть сформулирована следующая оптимизационная задача проектирования ускорителя: для каждого варианта алгоритма решения задачи $a_i, i = \overline{1, n}$ определить такие комбинации значений p_i, C_i и f_{hard}^i , при которых:

$$\begin{aligned} S_i &= \text{glob}_i + (\text{local}_i + \text{alu}_i) p_i C_i, \\ p_i &\leq P, \\ S_i &\leq S, \\ \frac{n_{\text{hard}}^i}{p_i f_{\text{hard}}^i} &\leq T_{\text{fix}}, \\ T_{\text{fix}} - \frac{n_{\text{hard}}^i}{p_i f_{\text{hard}}^i} &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате для алгоритмов $a_i, i = \overline{1, n}$ могут быть определены соответствующие множества $|A_i| = r_i$ комбинаций значений рассматриваемых параметров $(p_i^k, C_i^k, f_{\text{hard}}^{i,k}), k = \overline{1, r_i}$, являющиеся альтернативными вариантами изготовления ускорителя. Выбор проектного(ых) варианта(ов) ускорителя может быть выполнен по результатам их имитационного моделирования средствами САПР, а также с учетом дополнительных критериев, таких как энергопотребление, себестоимость, вероятность выхода из строя и т.п.

Решение представленной выше задачи определения характеристик ускорителя в соответствии с параметрами реализуемого алгоритма целесообразно автоматизировать. Этому направлению будут посвящены дальнейшие исследования авторов, однако ниже представлен общий подход к решению данной задачи.

Для перечисленных выше параметров p_i, C_i и f_{hard}^i каждого из $a_i, i = \overline{1, n}$ альтернативных алгоритмов могут быть составлены универсальные множества вариантов значений P, C, F , которые вместе с множеством $A (a_i \in A, i = \overline{1, n})$ формируют четырехмерный массив W исходных данных рассматриваемой задачи. Элементы соответствующего массива будут содержать значение «0» в случае несовместности конкретного варианта значений четырех рассматриваемых параметров или значение выражения (5) – в случае допустимости их совместной реализации и использования для его вычисления параметров $n_{\text{hard}}^i, \text{local}_i, \text{alu}_i, \text{glob}_i$ соответствующего алгоритма $a_i, i = \overline{1, n}$.

Заметим, что множества P, C, F в общем случае детерминированы, а количество вариантов алгоритмов

решения конкретной задачи, как правило невелико. Следовательно, массив W универсален в контексте множеств P, C, F , а в контексте конкретной задачи обработки данных, как правило, не обладает большой размерностью. Поэтому задачи расчета и перебора значений его элементов, позволяющие анализировать варианты реализации гетерогенных вычислительных систем с аппаратным ускорением массово-параллельной потоковой обработки данных, не будут характеризоваться высокой вычислительной сложностью.

Изложенные выше постановка задачи и порядок определения соответствующих ей исходных данных позволяют сформировать методику анализа и оценки вариантов реализации аппаратных ускорителей гетерогенных вычислительных систем массово-параллельной потоковой обработки данных. Предложенная методика, по результатам ее дальнейшего развития, может претендовать на универсальность – применяться при разработке ТЗ на изготовление аппаратных ускорителей, при их проектировании в соответствии с заданными требованиями, для обоснования принимаемых решений относительно конфигурации аппаратного ускорителя, а также при составлении заданий на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы с целью достижения целевых значений $f_{\text{hard}}, n_{\text{hard}}, C_{\text{max}}$ и S_{max} для конкретных предметно-ориентированных задач массово-параллельной обработки данных и функциональных возможностей САПР.

Развитие представленной методики будет изложено в следующих работах авторов, в т.ч. в контексте применения к работе с массивом W технологий интерактивной аналитической обработки данных (OLAP, online analytical processing).

Если рассматривать гетерогенные системы массово-параллельной обработки данных как отдельное перспективное направление развития вычислительной техники, то предложенная методика, основываясь на требованиях к параметрам решения наиболее востребованных предметно-ориентированных задач, может найти применение как инструмент научно-технической политики, позволяющий определять и обосновывать потребности в достижении целевых доступных значений:

- характеристик системных шин и интерфейсов сопряжения ускорителей с вычислительными системами (T_{block}),
- схемотехнических решений и технологий литографии (f_{hard}),
- технологий корпусирования интегральных схем (p),
- алгоритмов решения задач и математического обеспечения компиляторов (n_{hard}),
- систем высокоуровневого проектирования и программного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях повышения эффективности решения и расширения круга задач, решаемых за счет программирования массово-параллельных ускорителей, авторами предложены архитектура и методика проектирования гетерогенных вычислительных систем, использующих специализированные аппаратные ускорители с массовым параллелизмом вычислений и независимо программируемыми специализированными процессорными ядрами. Такое решение дополняет вычислительные системы на базе процессоров общего назначения и архитектурно отличается от устройств класса «графический процессор» вследствие возможности независимого программирования отдельных узлов. Показано, что повышение производительности достигается путем увеличения количества параллельно работающих узлов и их специализации, которую предлагается выполнять на основе анализа графа вычислений, формируемого специально разрабатываемым компилятором, ориентированным на подкласс задач целевой предметной области. Предложенный авторами коэффициент ускорения вычислений обосновывает целесообразность выполнения в процессе разработки ускорителей комплексной оптимизации с учетом трех уровней представления проекта: программной модели, схематехнического описания и топологического представления в выбранном технологическом базисе. Определить технические характеристики требуемого ускорителя позволяет предложенная методика анализа и оценки вариантов реализации аппаратных ускорителей гетерогенных

вычислительных систем массово-параллельной потоковой обработки данных. Полученная в результате методика проектирования вычислительных систем данного класса призвана обеспечить регулируемый процесс оптимизации характеристик по требуемым критериям.

Вклад авторов

Изложенные в статье исследования и результаты получены авторами совместно по итогам организации работы научной школы «Специализированные гетерогенные вычислительные системы» Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет».

Основное содержание раздела «Анализ и оценка вариантов реализации аппаратных ускорителей гетерогенных вычислительных систем массово-параллельной потоковой обработки данных», в т.ч. задача оптимизации архитектуры аппаратного ускорителя в виде задачи поиска в пространстве архитектурных вариантов и методика анализа и оценки вариантов реализации аппаратных ускорителей, составлено А.С. Зуевым.

Authors' contributions

The research and results presented in the article were obtained jointly by the authors as an outcome of the scientific school “Specialized Heterogeneous Computing Systems” organized by the Institute of Information Technologies at the MIREA – Russian Technological University.

The main content of the section “Analysis and evaluation of implementation options for hardware accelerators in heterogeneous computing systems for massively parallel stream data processing,” including the task of optimizing the hardware accelerator architecture formulation as a search problem in the space of architectural options, as well as the methodology for analyzing and evaluating implementation options of hardware accelerators, was developed by A.S. Zuev.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Dennard R.H., Gaensslen F.H., Yu H.-N., Rideout V.L., Bassous E., LeBlanc A.R. Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1974;9(5):256–268. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>
2. Jain P.U., Tomar V.K. FinFET Technology: As A Promising Alternatives for Conventional MOSFET Technology. In: *2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*. 2020. P. 43–47. <https://doi.org/10.1109/ESCI48226.2020.9167646>
3. Yakimets D., Eneman G., Schuddinck P., et al. Vertical GAAFETs for the Ultimate CMOS Scaling. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015;62(5):1433–1439. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2414924>
4. Lee S.-Y., Kim S.-M., Yoon E.-J., et al. A Novel Multibridge-Channel MOSFET (MBCFET): Fabrication Technologies and Characteristics. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2003;2(4):253–257. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2003.820777>
5. Hennessy J.L., Patterson D.A. *Computer Architecture: A Quantitative Approach (The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design)*. 6th ed. 2017, 936 p.
6. Annaratone M. MPPs, Amdahl's Law, and Comparing Computers. In: *Proceedings of The Fourth Symposium on the Frontiers of Massively Parallel Computation*. 1992. P. 465–470. <https://doi.org/10.1109/FMPC.1992.234879>
7. Verhelst M., Benini L., Verma N. How to keep pushing ML accelerator performance? Know your rooflines! *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2025;6(60):1888–1905. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2025.3553765>
8. Altaf M.S.B., Wood D.A. LogCA: A high-level performance model for hardware accelerators. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*. 2017;45(2):375–388. <https://doi.org/10.1145/3079856.3080216>
9. Molina R.S., Gil-Costa V., Crespo M.L., et al. High-level synthesis hardware design for FPGA-based accelerators: Models, methodologies, and frameworks. *IEEE Access*. 2022;10:90429–90455. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201107>

10. A New Golden Age for Computer Architecture: Domain-Specific Hardware/Software Co-Design, Enhanced Security, Open Instruction Sets, and Agile Chip Development. In: *2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*. 2018. P. 27–29. <https://doi.org/10.1109/ISCA.2018.00011>
11. Liu K., Lu A., Fang Z. BitBlender: Scalable Bloom Filter Acceleration on FPGAs with Dynamic Scheduling. In: *34th International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL)*. 2024. P. 325–331. <https://doi.org/10.1109/FPL64840.2024.00052>
12. Kulkarni A., Chiosa M., Preuber T.B., et al. HyperLogLog Sketch Acceleration on FPGA. In: *30th International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL)*. 2020. P. 47–56. <https://doi.org/10.1109/FPL50879.2020.00019>
13. Marchisio A., Teodonio F., Rizzi A., et al. ISMatch: A Real-Time Hardware Accelerator for Inexact String Matching of DNA Sequences on FPGA. *Microprocess. Microsyst.* 2023;97:104763. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104763>
14. Zhang C., Tang X., Peng Y. Enhancing Regular Expression Processing through Field-Programmable Gate Array-Based Multi-Character Non-Deterministic Finite Automata. *Electronics*. 2024;13(9):1635. <https://doi.org/10.3390/electronics13091635>
15. Dann J., Wagner R., Ritter D., et al. PipeJSON: Parsing JSON at Line Speed on FPGAs. In: *Proceedings of the 18th International Workshop on Data Management on New Hardware*. 2022; Article 3:1–7. <https://doi.org/10.1145/3533737.3535094>
16. Karandikar S., Udipi A.N., Choi J., et al. CDPUs: Co-Designing Compression and Decompression Processing Units for Hyperscale Systems. In: *Proceedings of the 50th Annual International Symposium on Computer Architecture*. 2023; Article 39:1–17. <https://doi.org/10.1145/3579371.3589074>
17. Hahn T., Wildermann S., Teich J. JSON-CooP: A JSON Decompression/Parsing Co-Design for FPGAs. In: *34th International Conference on Field-Programmable Logic and Applications (FPL)*. 2024. P. 11–18. <https://doi.org/10.1109/FPL64840.2024.00012>
18. Fang J., Mulder Y., Hidders J., et al. In-Memory Database Acceleration on FPGAs: A Survey. *The VLDB Journal*. 2020;29(10):33–59. <https://doi.org/10.1007/s00778-019-00581-w>
19. Dann J., Götz T., Ritter D., et al. GraphMatch: Subgraph Query Processing on FPGAs. *arXiv*. arXiv:2402.17559. 2024.
20. Kejariwal A., Kulkarni S., Ramasamy K. Real Time Analytics: Algorithms and Systems. *arXiv*. arXiv:1708.02621. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.02621>
21. Alcolea A., Resano J. FPGA Accelerator for Gradient Boosting Decision Trees. *Electronics*. 2021;10(3):314. <https://doi.org/10.3390/electronics10030314>
22. Graf J.R., Perera D.G. Optimizing Density-Based Ant Colony Stream Clustering Using FPGA-Based Hardware Accelerator. In: *2023 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/ISCAS46773.2023.10181665>
23. Shen J.P., Lipasti M.H. *Modern Processor Design: Fundamentals of Superscalar Processors*. Waveland Press; 2013, 658 p.
24. Тарасов И.Е., Советов П.Н., Люлява Д.В., Мирзоян Д.И. Методика проектирования специализированных вычислительных систем на основе совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения. *Russian Technological Journal*. 2024;12(3):37–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45>
[Tarasov I.E., Sovietov P.N., Lulyava D.V., Mirzoyan D.I. Method for designing specialized computing systems based on hardware and software co-optimization. *Russian Technological Journal*. 2024;12(3):37–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45>]

Об авторах

Зуев Андрей Сергеевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой квантовых информационных технологий, практической и прикладной информатики, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zuev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 23977152300, SPIN-код РИНЦ 6737-5778, <https://orcid.org/0000-0002-1797-7585>

Советов Петр Николаевич, к.т.н., доцент, кафедра корпоративных информационных систем, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: peter.sovietov@gmail.com. Scopus Author ID 57221375427, SPIN-код РИНЦ 9999-1460, <http://orcid.org/0000-0002-1039-2429>

Тарасов Илья Евгеньевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры корпоративных информационных систем, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tarasov_i@mirea.ru. Scopus Author ID 57213354150, SPIN-код РИНЦ 4628-7514, <http://orcid.org/0000-0001-6456-4794>

About the Authors

Andrey S. Zuev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Quantum Information Technologies, Practical and Applied Informatics, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zuev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 23977152300, RSCI SPIN-code 6737-5778, <https://orcid.org/0000-0002-1797-7585>

Peter N. Sovietov, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: peter.sovietov@gmail.com. Scopus Author ID 57221375427, RSCI SPIN-code 9999-1460, <http://orcid.org/0000-0002-1039-2429>

Ilya E. Tarasov, Dr. Sci. (Eng.), Associated Professor, Professor, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tarasov_i@mirea.ru. Scopus Author ID 57213354150, RSCI SPIN-code 4628-7514, <http://orcid.org/0000-0001-6456-4794>

УДК 378.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-42-56>

EDN XNQJRO



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Программные методы обработки, анализа и визуализации учебных планов

Е.А. Халтурин^{1, @}, А.А. Кытманов², Ю.В. Вайнштейн¹, Т.В. Зыкова¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ekhalturin97@yandex.ru

• Поступила: 20.02.2025 • Доработана: 02.10.2025 • Принята к опубликованию: 11.02.2026

Резюме

Цели. Цель работы – поиск методов и подходов разработки программного комплекса для обработки, анализа и визуализации данных учебных планов образовательных программ в автоматизированном режиме.

Методы. Проведен теоретический анализ научных работ и результатов в области исследования. В программном комплексе используются следующие методы: для обработки данных – регулярные выражения, для анализа посредством выявления различий – метод сравнительного анализа и методы описательной математической статистики, для визуализации результатов – графовая модель представления данных.

Результаты. Разработана архитектура программного комплекса для обработки (с предобработкой), анализа и визуализации учебных планов с использованием принципов объектно-ориентированного программирования SOLID¹. Программная реализация на языке программирования C++ использована для подсчета характеристик учебных планов и создания графового представления, на основе которого предложен собственный способ визуализации учебных планов. Продемонстрированы возможности программного комплекса: проведен сравнительный анализ учебных планов, выявлены их особенности, обнаружены недочеты при их проектировании.

Выводы. Использование программного комплекса обработки, анализа и визуализации учебных планов может помочь выявить особенности учебного плана, указать на возможные недоработки и слабые места, провести сравнительный анализ разных учебных планов. Его применение позволит повысить качество управления образовательным процессом, заполнить пробелы в области анализа образовательных данных и будет способствовать созданию цифровой экосистемы вуза. Результаты работы могут быть полезны преподавателям, проектирующим и разрабатывающим учебные планы, представителям административно-управленческого персонала, в т.ч. работникам учебно-организационных отделов, а также другим участникам образовательного процесса вуза.

Ключевые слова: учебный план, образовательная программа, методы, программная обработка, графовая модель, компетентностный подход, междисциплинарные связи

¹ S (single responsibility principle) – принцип единственной ответственности; O (open-closed principle) – принцип открытости-закрытости; L (Liskov substitution principle) – принцип подстановки Барбары Лисков; I (interface segregation principle) – принцип разделения интерфейса; D (dependence inversion principle) – принцип инверсии зависимостей. [S is the single responsibility principle; O is an open-closed principle; L is the Liskov substitution principle; I is the interface segregation principle; D is the dependence inversion principle.]

Для цитирования: Халтурин Е.А., Кытманов А.А., Вайнштейн Ю.В., Зыкова Т.В. Программные методы обработки, анализа и визуализации учебных планов. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):42–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-42-56>, <https://www.elibrary.ru/XNQJRO>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Software methods for curriculum processing, analysis and visualization

Evgenii A. Khalturin ^{1, @}, Alexey A. Kytmanov ², Yuliya V. Vaynshteyn ¹,
Tatiana V. Zykova ¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ekhalturin97@yandex.ru

• Submitted: 20.02.2025 • Revised: 02.10.2025 • Accepted: 11.02.2026

Abstract

Objectives. The purpose of this study is to identify methods and approaches to developing a software package which can automate the processing, analysis, and visualization of curricula in educational programs.

Methods. We provide an overview of relevant scholarly literature and research results. The software package applies regular expressions for data processing, comparative analysis, and descriptive statistics to identify differences. It also uses a graph-based model for visualization.

Results. We designed the architecture of a software package for preprocessing, analyzing, and visualizing curricula following the SOLID² principles of object-oriented programming. We implemented the package in C++, in order to calculate curriculum characteristics and build a graph representation. This formed the basis of our proposed visualization method. We demonstrate the functionality of the package through a comparative analysis of curricula, identification of distinctive features, and detection of design shortcomings.

Conclusions. Our software package helps identify specific features, reveal possible weaknesses, and support the comparative analysis of different curricula. Using it improves the quality of educational process management, addresses gaps in educational data analysis, and contributes to the creation of a university digital ecosystem. The results of our study are useful for faculty members designing and developing curricula, as well as administrative and managerial staff (including those in academic affairs) and other higher education stakeholders.

Keywords: curriculum, educational program, method, software, graph model, competency-based approach, interdisciplinary links

For citation: Khalturin E.A., Kytmanov A.A., Vaynshteyn Yu.V., Zykova T.V. Software methods for curriculum processing, analysis and visualization. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):42–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-42-56>, <https://www.elibrary.ru/XNQJRO>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

² S is the single responsibility principle; O is an open-closed principle; L is the Liskov substitution principle; I is the interface segregation principle; D is the dependence inversion principle.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время управление образовательным процессом в вузе основано на использовании большого количества разнообразных данных об обучающихся и их процессе обучения; сведений, касающихся образовательных программ (ОП), преподавателей, обеспечивающих их реализацию и т.д. При этом имеющиеся данные используются лишь частично, как правило, для обеспечения административной поддержки образовательного процесса. Например, вуз располагает данными о компетенциях, которые должны сформироваться в результате освоения определенной ОП и статистикой трудоустройства выпускников, освоивших эту программу, однако далеко не всегда проводится анализ взаимосвязей между этими данными с целью внесения изменений в ОП или образовательный процесс для обеспечения лучших результатов ее освоения.

Таких примеров много, все это связано с тем, что в настоящее время управление образованием осуществляется на основе классического подхода учебной аналитики [1]. Однако технологии сбора, обработки и анализа данных стремительно развиваются, что в свою очередь влечет разработку новых подходов [2]. Для успешного внедрения таких подходов в повседневную практику необходимо создание программных инструментов, позволяющих получать в режиме реального времени необходимые для анализа и корректировок данные об образовательном процессе. Созданию и описанию особенностей информационных систем (ИС), использующих данные инструменты, и созданию на их основе интеллектуальных систем посвящено большое число работ (см., например, [3–6]).

Одним из основных объектов анализа образовательного процесса является ОП, которую можно рассматривать как план достижения заявленных образовательных результатов. В частности, в ОП описаны особенности процесса обучения, представлен набор компетенций, которые должны быть сформированы у обучающегося по завершению обучения. Поэтому востребованность ОП во многом зависит от того, насколько она удовлетворяет ожиданиям ее основных потребителей [7]: обучающихся, представителей обучающихся, профессорско-преподавательского состава, административно-управленческого персонала, внешних экспертов, в т.ч. представителей потенциальных работодателей и т.п. Качество ОП играет существенную роль в репутационной составляющей вуза.

Ключевым компонентом ОП является ее учебный план (УП), который описывает схему ее реализации. В УП содержатся данные о компетенциях, индикаторах их достижения, учебные

единицы (УЕ) – дисциплины, практики, государственная итоговая аттестация (ГИА), их порядок следования и трудоемкость. Учебный план является ценным источником информации для управления образовательным процессом. На основе анализа возможно предварительно оценить процесс реализации ОП и выявить ее характерные признаки.

Отметим, что большая часть научных работ, посвященных обработке УП, демонстрирует ручной способ обработки, без использования программных инструментов автоматизации процесса. В настоящей работе демонстрируются разработка и применение программных методов обработки (включая предобработку), анализа и визуализации УП, реализация которых представлена в разработанном программном комплексе. Посредством данного программного комплекса становится возможным привести УП к единому формату, выявить их особенности, произвести их сравнительный анализ, а также представить их в графовой модели для последующей визуализации.

Актуальной задачей исследования является оценка эффективности формирования заявленных в ОП компетенций, что решается анализом взаимосвязей запланированных результатов обучения и широкого спектра показателей обучения, например, процента перевода обучающихся на другие программы. В настоящей статье делается шаг к автоматизации процессов анализа структуры УП и вычисления их характеристик, которые в дальнейшем могут быть связаны с качеством формирования компетенций.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для того чтобы создать программный инструмент, выявляющий как можно большее количество неочевидных пользователю особенностей УП, соответствующий современным подходам интеллектуального анализа данных [8] и имеющий возможность внедрения в цифровую экосистему вуза, было проанализировано множество исследований, которые можно классифицировать на 5 тематических направлений (от общего к частному):

- 1) Цифровая трансформация: влияние цифровой трансформации в вузах на разных уровнях управления данными.
- 2) Интеллектуальные системы принятия решений на основе данных: проблемы и возможности ИС в целом, как современного подхода синтеза новых и выявления закономерностей в имеющихся данных.
- 3) Оценка ОП: оценка их качества и возможности улучшения.
- 4) Компетентностная составляющая: способы оценки компетентностной составляющей ОП.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA		
1	-	-	-	Форма контроля							з.е.		Итого акад. часов								Курс 1		Курс 2		Курс 3		Курс 4		
2				Экзам	Заче	Заче	КП	КР	ДКР	Др	Эксп	Факт	Эксп	По	Конт.	Ауд.	СР	Конт	Пр.	з.е.	з.е.	з.е.	з.е.	з.е.	з.е.	з.е.	з.е.		
3	Считать в плане	Индекс	Наименование	мен	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т		
4	Блок 1. Дисциплины (модули)											213	213	7996	7996	3748	3748	3348	900	27.5	28.5	28	28	28.5	28.5	30	14		
5	Обязательная часть											139	139	5332	5332	2722	2722	2034	576	27.5	28.5	24	22	15.5	7.5	14			
6	+	Б1.О.01	Философия	4							4	4	144	144	54	54	54	36					4						
7	+	Б1.О.02	История		12						4	4	144	144	72	72	72				2	2							
8	+	Б1.О.02.01	История России		1						2	2	72	72	36	36	36				2								
9	+	Б1.О.02.02	Всеобщая история		2						2	2	72	72	36	36	36					2							
10	+	Б1.О.03	Иностранный язык	4	123						9	9	324	324	144	144	144	36			2	2	2	3					
11	Часть, формируемая участниками образовательных отношений											74	74	2664	2664	1026	1026	1314	324					4	6	13	21	16	14
12	+	Б1.В.01	Методы оптимизации	6	5						9	9	324	324	108	108	180	36							3	6			
13	+	Б1.В.02	Теория чисел	5							4	4	144	144	72	72	36	36						4					
14	+	Б1.В.03	Интегральные преобразования	7							5	5	180	180	72	72	72	36								5			
15	+	Б1.В.04	Теоретическая механика	3							4	4	144	144	36	36	72	36					4						

Рис. 1. Фрагмент экспортированной из ИС «Планы» таблицы Microsoft Excel. КП – курсовой проект, КР – курсовая работа, ДКР – дистанционная курсовая работа, Др – другое, СР – самостоятельная работа, С1–С8 – семестры

Таблица 1. Форматы заполнения УП (нижним подчеркиванием указаны различия)

№	УП	Данные со страницы «Компетенции(2)». Столбец «Формируемые компетенции»
1	01.04.02.07 «Прикладные вычисления в науке и технике» (эталонный вариант)	УК-1, УК-2, УК-3, УК-4, УК-6, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4
2	09.04.01.06 «Микропроцессорные системы» (неправильный вариант)	<u>ИД-1</u> УК-6, <u>ИД-2</u> УК-6, <u>ИД-3</u> УК-6, <u>ИД-1</u> ОПК-1, <u>ИД-2</u> ОПК-1, <u>ИД-3</u> ОПК-1, <u>ИД-1</u> ОПК-3
3	10.03.01.31 «Безопасность компьютерных систем» (двойные индикаторы)	УК-1, ОПК-7, ОПК-8, ОПК-1.1, ОПК-1.3, ОПК-1.4
4	09.03.03.32 «Прикладная информатика в социальных коммуникациях» (указаны индикаторы вместо компетенций)	УК-1.1, УК-1.2, УК-1.3, ОПК-1.1, ОПК-1.2, ОПК-1.3, ОПК-4.1, ОПК-4.2, ОПК-4.3

Примечание: УК – универсальные компетенции, ОПК – общепрофессиональные компетенции, ИД – идентификаторы.

5) Анализ данных УП: возможности анализа данных УП с целью получения общего представления о проектировании ОП.

В результате анализа исследований разработаны автоматизированные методы и подходы к созданию программного комплекса SPA-SFU³ (от англ. System-Plans-Analyze of Siberian Federal University). Исходными данными для SPA-SFU² выступают данные ИС «Планы», разработанной Лабораторией ММИС⁴. Данная ИС широко распространена среди вузов России для работы с УП и удовлетворяет их потребностям, но, несмотря на это, при сопоставлении целей исследования и базы данных ИС «Планы» обнаружена избыточность (рис. 1). На рис. 1 представлен фрагмент входных для данных SPA-SFU², где цветом отмечены: красным – пустые поля УП; желтым – повторяющиеся поля; зеленым – поля со значимыми для исследования данными. Обратим внимание, что в столбце «С»

указаны наименования УЕ – дисциплины, практики и ГИА, на которые отводятся зачетные единицы (ЗЕ) и которые являются основными структурными элементами УП.

В связи с тем, что вузы работают с УП разных федеральных государственных стандартов высшего образования (ФГОС ВО), созданных в разные годы и разными проектировщиками, форматы вносимых данных существенно различаются. При этом все они соответствуют федеральному законодательству и локальным нормативным документам, но их многообразие делает сложным разработку программных методов предобработки УП, в связи с чем были разработаны алгоритмы приведения их к единому стандарту для устранения различий. Различия выражаются в отклонении формата заполнения данных УП от наиболее распространенного среди используемых УП в исследовании (табл. 1, стандартный формат данных указан в строке 1). Примеры различий: иной формат заполнения данных, использование иных имен УЕ, а также соответствующих им компетенций, иной способ указания индикаторов УЕ (табл. 1, нестандартный формат

³ <https://github.com/ekhalturin-ki15/SPA-SFU2>. Дата обращения 28.09.2025. / Accessed September 28, 2025. (In Russ.).

⁴ <https://www.mmis.ru>. Дата обращения 28.09.2025. / Accessed September 28, 2025. (In Russ.).

выделен нижним подчеркиванием) и пр. Устранение различий являлось наиболее трудоемкой задачей при проектировании программных методов, т.к. требовалось спрогнозировать ситуации, которые могут возникнуть при работе со всеми возможными УП.

Пример обнаруженного различия формата заполнения УП исследования: из табл. 1 видно, что УП 09.04.01.06 «Микропроцессорные системы» включает перечень индикаторов, а не компетенций (строка 2), что усложняет программный анализ данных. В качестве способа решения данной проблемы предлагается использовать резервное регулярное выражение, способное вычленив индикатор, в т.ч. и из иного способа оформления УП. Если проигнорировать данное различие формата заполнения, то возникнет ситуация, когда определена группа компетенций с названием «ИД-1УК», вместо «УК» (универсальная компетенция), что в дальнейшем внесет ошибку в расчетах процентного распределения по группам компетенций трудоемкости УЕ.

Другим примером может послужить различие, возникшее в УП 10.03.01.31 «Безопасность компьютерных систем» (строка 3). В нем присутствуют компетенции, которые по виду идентичны индикаторам достижения компетенций (ситуация возникновения двойных индикаторов). Отметим, что существуют УП с перечислением не компетенций, а перечня формируемых индикаторов, как это представлено в УП 09.03.03.32 «Прикладная информатика в социальных коммуникациях» (строка 4), из-за чего требуется дополнительный анализ ситуации пользователем SPA-SFU2 для того, чтобы обозначить, что именно представлено в УП: компетенции или индикаторы их достижения.

Отметим, что часть данных УП с точки зрения программных методов обработки является статистическим выбросом. Например, перечень формируемых компетенций УЕ «Защита выпускной квалификационной работы» включает все возможные компетенции УП, что негативно влияет на объективность получаемой графовой модели. Отметим, что чаще всего выбросами являются УЕ, относящиеся к практикам и к ГИА, т.к. для них указан полный перечень формируемых компетенций всей совокупностью УЕ и встречается намного превосходящая остальные УЕ трудоемкость (измеряемая в ЗЕ). Присутствие выбросов снижает наглядность получаемых агрегированных данных. Например, метрика «количество компонент связности» будет равна единице, что не является информативным.

В итоге, после устранения различий, SPA-SFU2 оперирует только необходимыми и достаточными для комплексного анализа данными об УП, которые в Excel-таблицах располагаются на страницах:

- 1) на странице «Титул» определяются общие данные УП;
- 2) на странице «Компетенции(2)» определяется полный перечень УЕ;

- 3) на странице «Компетенции» сопоставляются индикаторы достижения компетенций. Помимо этого, определяется вложенность УЕ по модулям;
- 4) на странице «ПланСвод», продемонстрированной на рис. 1, определяется количество отводимых ЗЕ на изучение УЕ каждого семестра обучения, а также выясняется, является ли УЕ обязательной для освоения.

Использование вышеописанных данных позволяет устранить неоднозначность в данных (различие имен одинаковых сущностей и разные форматы заполнения), а также определить итоговые данные в различных разрезах:

- 1) интегральные характеристики по каждому отдельному семестру УП, по всем семестрам УП, по всей совокупности УП;
- 2) характеристики, определяющие силу междисциплинарных связей;
- 3) данные о графовых моделях УП;
- 4) процентные распределения трудоемкости формирования компетенций и индикаторов их достижения.

Итоговый результат SPA-SFU2 возможно применять для таких целей, как попарное сравнение УП между собой с целью выявления наиболее удачных моментов (порядка следования УЕ, определенных для УЕ формируемых компетенций, распределения нагрузки на УЕ), выявление типового УП для различных вузов для одинаковой ОП, а также определение специфичных ситуаций, которые возникают в случае большого отклонения от средней величины некоторой из характеристик УП (например, ситуации, когда большое количество процентов всей нагрузки отводится на формирование общепрофессиональных компетенций, что снижает нагрузку на иные компетенции, т.к. их суммарное количество строго нормировано в ФГОС ВО⁵).

Произведен анализ 49 УП Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Отметим, что анализ УП ничем не различается для уровней образования (бакалавриат, специалитет, магистратура), направлений подготовки и принадлежности вузу, т.к. их источником является ИС «Планы». Данный факт позволяет масштабировать исследование и повторно воспроизводить его в любых учреждениях, использующих ИС «Планы» для работы с УП.

Для понимания эффективности SPA-SFU2 в решении задачи анализа данных УП отметим его ключевые особенности: разработан программный комплекс на языке C++ с использованием минимально возможного количества сторонних библиотек (используется только библиотека

⁵ <https://www.fgosvo.ru>. Дата обращения 28.09.2025. / Accessed September 28, 2025. (In Russ.).

1	Название параметра	Значение параметра
2	Каталоги данных УП	plans\grad
3	Каталоги вывода результата	result\grad
4	Делить ЗЕ у компетенции на количество компетенций	да
5	Выводить % долю индикатора от всех ЗЕ УП	да
6	Граф неориентированный	да
7	Использовать многоуровневые индикаторы	нет
8	Максимальная длина названия дисциплин	15
9	Регулярное выражение разбивки индикатора	$(\{w\{1,\}.{0,\}-.{1,\}}\{.\{0,\}})$
10	Регулярное выражение разбивки индикатора (доп.)	$\{w\{1,\}.{0,\}-(\{d\{1,\}})(\{w\{1,\}.{0,\}-.{1,\}})$
11	Регулярное выражение разбивки компетенции	$(\{w\{1,\}}\{W\{0,\}-.{1,\}})$
12	Сколько семестров в одном курсе	2
13	Количество квартилей	4
14	Компетенций много, если их число больше X =	6
15	Усечение среднего для квартилей	0.05
16	Создавать ребро, если его вес больше X =	0.001
17	L – ЗЕ левой вершины R – ЗЕ правой вершины A – суммарное количество ЗЕ N – суммарное количество дисциплин K – мощность пересечения по компетенциям D – мощность пересечения по дисциплинам Поддерживаются операторы +, -, *, /, ^ (степень), mod, abs, sin, cos, log	Можно использовать любые формулы, например: 1) Из SPA-SFU версии № 1: $((L + R) / (2 * A)) * K$ 2) Среднеарифметическое: $((L + R) / 2) * K$ 3) Среднегеометрическое: $((L * R) ^ (1 / 2)) * K$
18	Вес ребра графа, где вершина – это дисциплина	$(5 * (L + R) / (A)) * K$
19	Вес ребра графа, где вершина – это компетенция	$(5 * (L + R) / (A)) * D$

Рис. 2. Фрагмент конфигурационного файла программы

OpenXLSX⁶ для оперирования с Excel-таблицами), что позволяет ему оперировать со всей совокупностью данных 10 УП менее чем за секунду (в одном УП более 2 тыс. анализируемых ячеек, а вместе с подсчитанными SPA-SFU2 данными по завершению выполнения программы их становится более 10 тыс.).

В исследовании использованы графовые представления УП, что является стандартным подходом при анализе УП и используется во многих исследованиях [9, 10]. Графовое представление позволяет получить метрики для определения гипотез относительно корректности структуры УП. Программный комплекс SPA-SFU2 вычисляет данные УП о соответствующей ему графовой модели. Существует множество способов представить УП в виде графа, но в настоящем исследовании выбрано 4 основных. В каждом из способов ребра между вершинами рассчитываются по формуле, указанной в конфигурационном файле (рис. 2, строка 18). Отметим, что используется формула, которая учитывает количество совпадающих компетенций (чем больше количество совпадений, тем больше вес ребра) и трудоемкость, измеряемую в ЗЕ.

Перечислим способы построения графовой модели УП:

- 1) «Стандартная» графовая модель, где множеству вершин соответствуют УЕ, а ребра между

вершинами указывают на междисциплинарную связь по пересечению в перечне формируемых компетенций. Вес вершины соответствует трудоемкости УЕ (сколько ЗЕ отводится под ее освоение), а вес ребра соответствует количеству совпавших компетенций (более подробно данная модель описана в [11]).

- 2) «Расширенная» графовая модель, где множеству вершин соответствуют УЕ с градацией на семестры обучения. Одной УЕ может принадлежать несколько вершин, если ее освоение проводится в несколько семестров. В работе [12] для анализа УП используется аналогичное графовое представление.
- 3) «Обратная» графовая модель, где множеству вершин соответствуют компетенции. Для данной модели в конфигурационном файле программы предусмотрена дополнительная формула (рис. 2, строка 19). Схожая модель используется в [13].

В настоящем исследовании использован метод математической статистики. На основе данных УП определяются меры центральной тенденции и подсчитывается квартильное распределение. Данные о графовых моделях хранятся в виде списка смежности, что позволяет достичь наилучшей асимптотики алгоритмов. Так, например, подсчет глобального коэффициента кластеризации (назначение которого указывается в [14]) имеет асимптотику $O(|V| \times |E|)$, где $|V|$ – количество вершин, $|E|$ – количество ребер. Описание данного алгоритма представлено

⁶ <https://github.com/troldal/OpenXLSX>. Дата обращения 28.09.2025. / Accessed September 28, 2025.

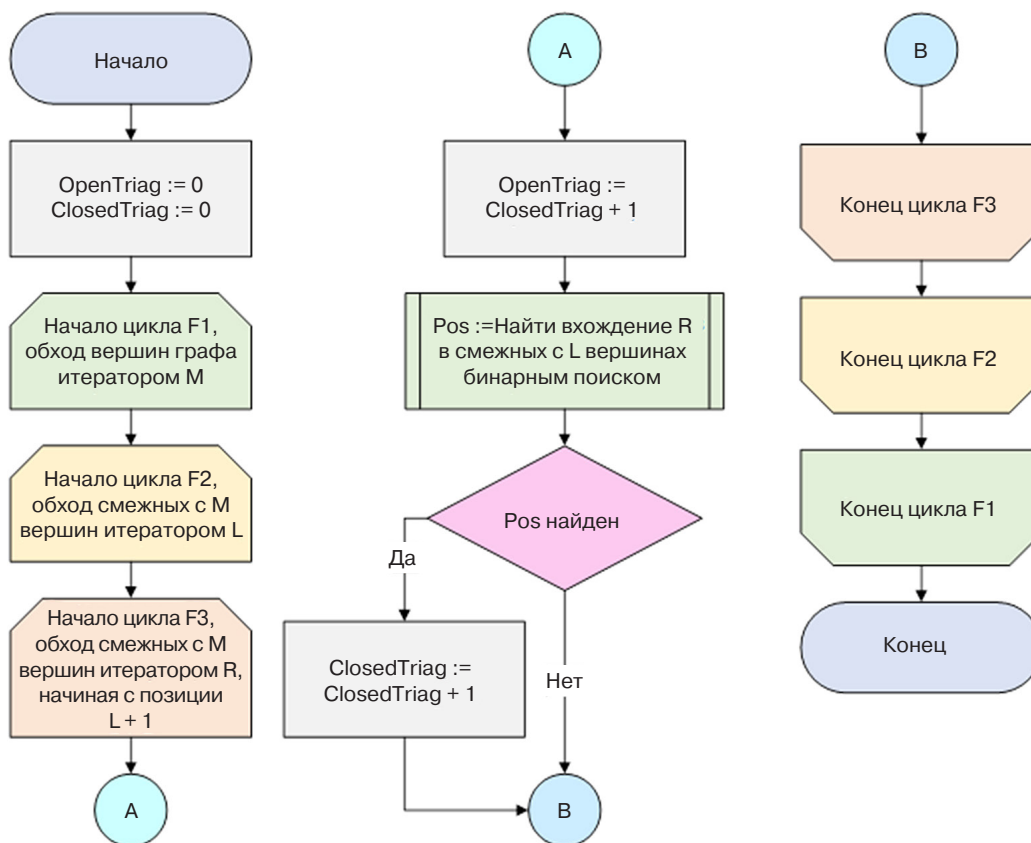


Рис. 3. Блок-схема алгоритма подсчета глобального коэффициента кластеризации графа

на рис. 3. Применение бинарного поиска становится возможным благодаря хранению номеров вершин в списке смежности в возрастающем порядке. Переменная *OpenTriag* используется для подсчета и хранения количества «открытых треугольников», т.е. состояний, когда для трех точек образуются только два из трех возможных соединений. Аналогичное назначение у переменной *ClosedTriag*, только для состояний, когда для трех точек образуются все три соединения. Коэффициент кластеризации равен отношению *ClosedTriag* к *OpenTriag*. Как можно заметить, его значение не превышает единицу.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Программный комплекс *SPA-SFU2* представлен в виде консольного приложения, принимающего на вход *Excel*-таблицы из ИС «Планы» и по завершению создающего каталоги с *Excel*- и *csv*-таблицами. Выбор *Excel*-формата УП обусловлен его наглядностью для пользователя, а также простотой его редактирования и перестройки под другие задачи учебной аналитики. Например, пользователь может указать преподавателей УЕ вместо компетенций для того, чтобы определить распределение итоговой учебной нагрузки между ними. Отметим, что *SPA-SFU2* разработан с применением модульной архитектуры, которая

позволяет дополнять программный комплекс новым функционалом без изменения имеющегося, что, к примеру, при необходимости делает возможным добавление модуля обработки УП, в т.ч. и *xml*-формата.

Управление программой происходит посредством настройки ее параметров в конфигурационном файле (рис. 2, левый столбец перечисляет названия параметров, а правый – их значения). Присутствует возможность указать несколько независимых выборов УП (рис. 2, строка 2, в указанном каталоге данных УП находится несколько подкаталогов с таблицами *Excel*), каким образом проводить расчеты (рис. 2, строки 4–7), регулярные выражения для получения данных из ячеек *Excel*-таблиц (рис. 2, строки 9–11), пороговые значения (рис. 2, строки 12–16) и формулы, по которым проводятся вычисления (рис. 2, строки 17–19).

На рис. 4 изображена диаграмма «сущность – связь» в нотации Мартина [15], соответствующая базе данных разработанного программного обеспечения (ПО). Для удобства обозначения диаграммы, префикс перед именем поля указывает на его тип данных. Так, например, строковый тип данных поля *sName* из таблицы *DTCurricula* хранит в себе название УП. Цвета таблиц, как и их префикс в названии, указывают на их назначение: *DT* обозначает таблицу хранения данных, *R* – связующую таблицу, *Matrix* – таблицу хранения двумерного массива данных.

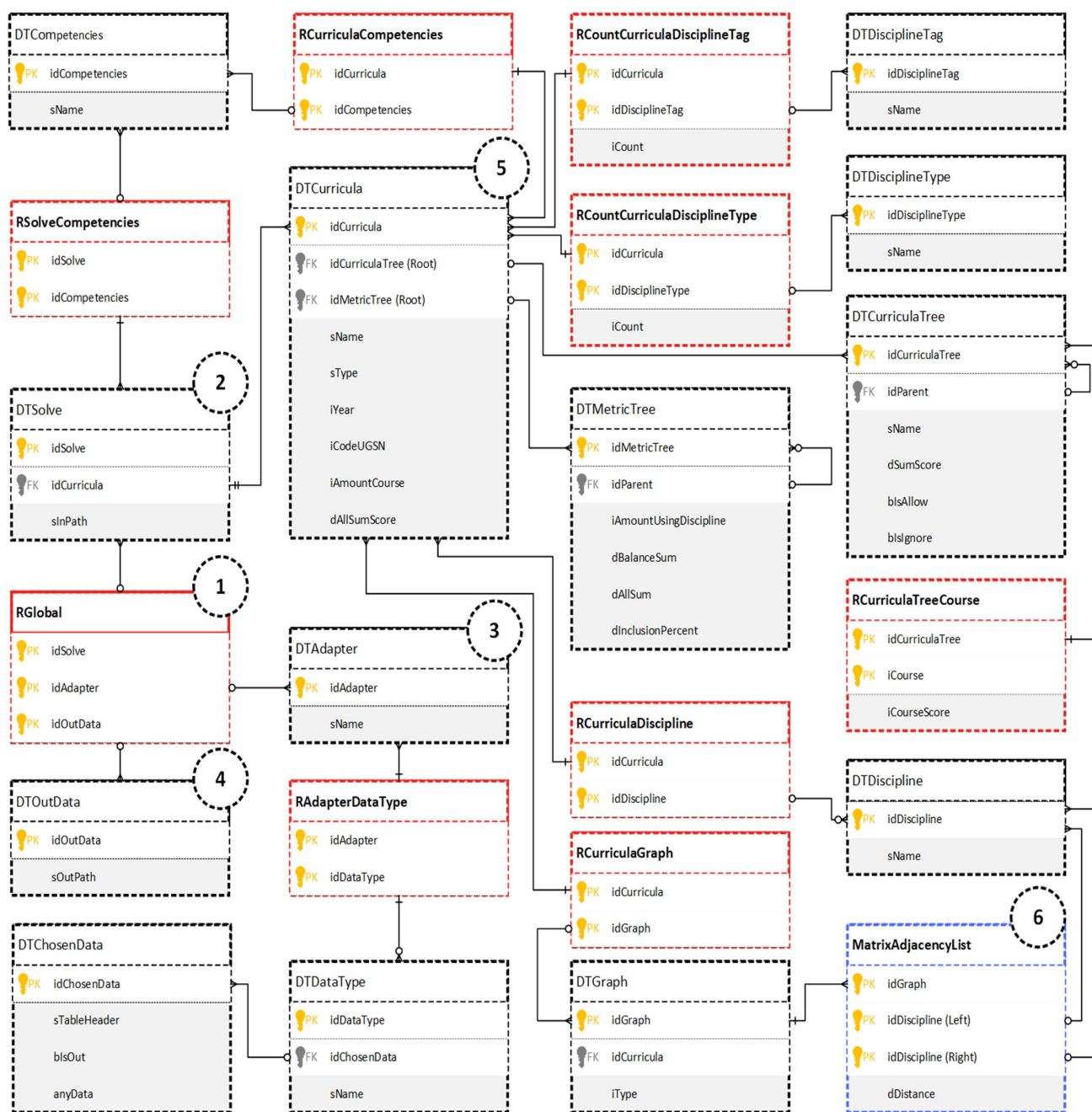


Рис. 4. Диаграмма «сущность – связь» базы данных программы

Архитектура программного комплекса основывается на правилах проектирования SOLID⁷ [16]. Таблица RGlobal (п. 1 на рис. 4) объединяет различные способы: а) ввода данных из DTSolve (п. 2 на рис. 4),

⁷ S (single responsibility principle) – принцип единственной ответственности; O (open-closed principle) – принцип открытости-закрытости; L (Liskov substitution principle) – принцип подстановки Барбары Лисков; I (interface segregation principle) – принцип разделения интерфейса; D (dependence inversion principle) – принцип инверсии зависимостей. [S is the single responsibility principle; O is the open-closed principle; L is the Liskov substitution principle; I is the interface segregation principle; D is the dependence inversion principle.]

что позволяет вводить параметры ПО не только через конфигурационный файл; б) агрегирования из DTAdapter (п. 3 на рис. 4), что позволяет использовать собственные способы построения графовой модели УП; в) вывода из DTOutData (п. 4 на рис. 4), что позволяет варьировать способы отображения данных, например, выгружать их напрямую в системы бизнес-аналитики, а не только в табличные файлы. Основной таблицей ПО является DTCurricula (п. 5 на рис. 4), в которой хранятся полученные на входе данные об УП. Все прочие таблицы хранят в себе данные, подсчитанные при помощи ПО.

Таблица 2. Метрики графовой модели двух УП бакалавриата

Название УП	09.03.02.30	09.03.03.33	Название УП	09.03.02.30	09.03.03.33
Коэффициент кластеризации	0.92	0.43	Плотность графа	0.14	0.12
Максимальное количество ЗЕ у УЕ	10 ЗЕ	15 ЗЕ	Минимальное количество ЗЕ у УЕ	2 ЗЕ	2 ЗЕ
Диаметр графа по весу	1.01	1.36	Диаметр графа по вершинам	5 вершин	4 вершины
Количество компонент связности	10	3	Пары несвязанных вершин	895 пар	89 пар
Вес максимального остовного дерева	10.86	16.34	Вес минимального остовного дерева	7.21	8.04

Для подсчета коэффициента кластеризации, описанного в методах исследования, используется список смежности, обозначенный на диаграмме как *MatrixAdjacencyList* (п. 6 на рис. 4), для улучшения итоговой асимптотики алгоритма до минимально возможной. Благодаря коэффициенту кластеризации графа возможно сделать выводы о том, насколько сильно взаимосвязаны УЕ между собой.

В табл. 2 показано, как отличаются графовые характеристики двух УП с максимальным (УП 09.03.02.30) и минимальным (УП 09.03.03.33) коэффициентами кластеризации по всей выборке УП бакалавриата (характеристика выделена жирным шрифтом, данная графовая модель обозначена как «стандартная» в разделе методов настоящего исследования), а на рис. 5 продемонстрирован возможный вариант их визуализации посредством программного комплекса *Gephi*⁸.

На рис. 5 в левой части представлена графовая модель УП 09.03.02.39, в правой части – УП 09.03.03.33. Каждый узел выражает УЕ, название которой указано в сокращенном варианте. Чем больше размер узла, тем больше его вес, выражающийся в ЗЕ, отводимых на изучение УЕ. Располагаются узлы снизу-вверх в зависимости от семестра, в котором они преподаются. Чем выше расположение узла, тем больше номер семестра (например, дисциплина «Бизнес-процессы в медиаиндустрии», именованная в графе для удобства визуализации в сокращенном варианте как «БизМедиа», преподается в 8 семестре бакалавриата). Одним цветом выделены УЕ, которые преподаются в одном семестре (все красные узлы преподаются в 1 семестре). Ребра между узлами указывают на междисциплинарную связь и рассчитываются по формуле, представленной на рис. 2 в 18 строке (пользователь может изменять формулу на произвольную). Чем больше ЗЕ отводится на изучение УЕ и чем больше компетенций совпало у УЕ, тем больше вес ребра между ними.

Если нет совпадающих компетенций, то вес равен нулю и ребро отсутствует.

Как можно видеть из табл. 2, подсчитанных суммарных характеристик достаточно для того, чтобы сделать предварительные заключения, а именно: в УП 09.03.02.30 «Информационные системы и технологии» присутствует большое количество компонент связности (областей, в которых существует путь между любыми двумя вершинами). Чем больше значение, тем более разнородны УЕ по своему перечню формируемых компетенций. В табл. 2 указаны и другие графовые характеристики, которые могут помочь определить качество УП при его экспертной оценке [17]: диаметр графа указывает на разрозненность компетенций между собой; плотность графа и вес остовного дерева – на суммарную силу междисциплинарных связей [11], количество несвязанных дисциплин – на разрозненность дисциплин по формируемым компетенциям.

Большой коэффициент кластеризации свидетельствует о том, что большинству УЕ соответствует идентичный перечень компетенций. Это говорит о том, что составители УП недостаточно внимательно отнеслись к задаче установления соответствия УЕ перечню формируемых ими компетенций и, возможно, произвели копирование одних и тех же данных в разные ячейки. В УП 09.03.03.33 «Прикладная информатика: цифровая экономика», напротив, каждой УЕ определен свой уникальный перечень компетенций.

Помимо графовой представления, *SPA-SFU2* вычисляет данные о количестве УЕ в зависимости от их принадлежности к виду (обязательные, по выбору, факультативные) и типу (гуманитарные, технические и естественнонаучные), а также то, сколько ЗЕ отводится на их изучение. Полученные данные явно указывают на специфику УП в зависимости от преобладания определенного типа дисциплин (например, возможно различное соотношение гуманитарных УЕ разных УП у смежных направлений подготовки, что демонстрирует их специфику).

⁸ <https://gephi.org>. Дата обращения 28.09.2025. / Accessed September 28, 2025.

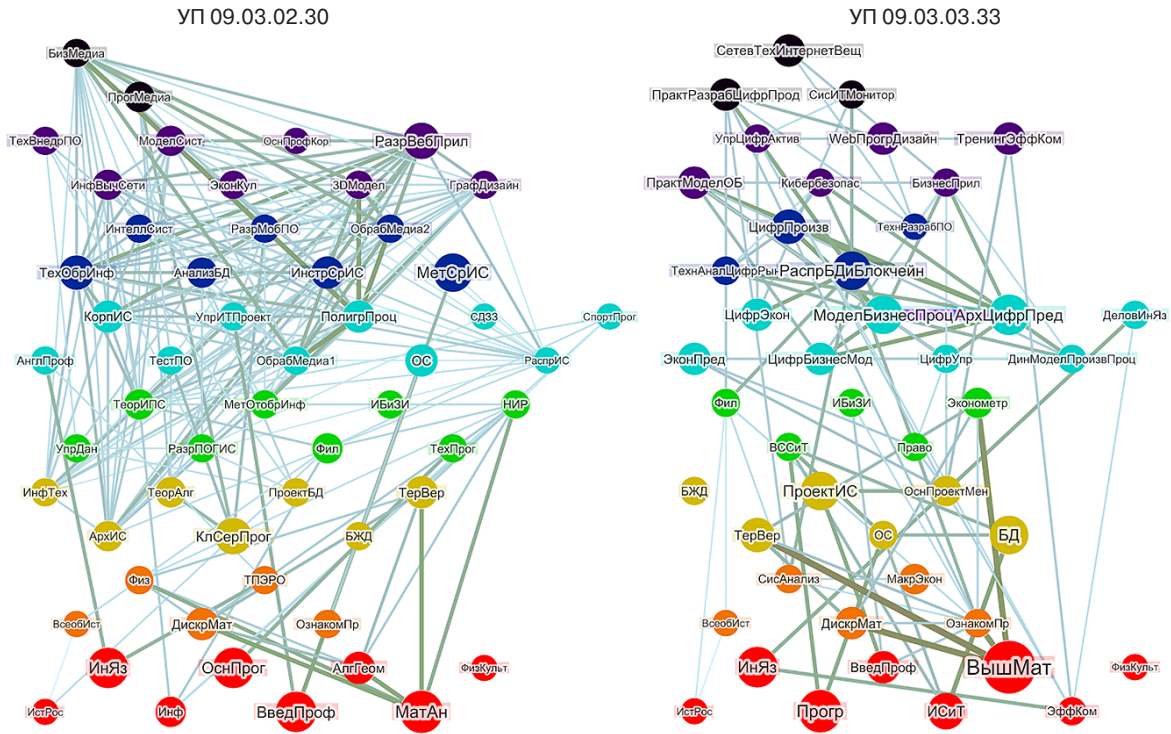


Рис. 5. Визуализация графовой модели УП по всем семестрам обучения.

ИнфТех – Информационные технологии;
ОзнакомПР — Ознакомительная практика;
НИР — Научно-исследовательская работа;
АрхИС – Архитектура ИС;
ТеорАлг – Теория алгоритмов;
УпрДан – Управление данными;
ТеорИПС – Теория информационных процессов и систем;
КлСерПрог – Клиент-серверное программирование;
ПроектБД – Проектирование баз данных;
АнглПроф – Английский язык для профессиональных целей;
ТехОбрИнф – Технологии обработки информации;
КорпИС – Корпоративные ИС;
ИнтеллСист – Интеллектуальные системы и технологии;
ТехВнедрПО – Технологии внедрения ПО;
ТестПО – Тестирование и контроль качества ПО;
РазрПОГИС – Разработка ПО геоинформационных систем;
УпрИТПроjekt – Управление проектами информационных технологий;
АнализБД – Анализ больших данных;
РазрМобПО – Разработка мобильного ПО;
МетОтобрИнф – Методы и средства отображения информации;
ИнфВысСети – Информационно-вычислительные сети;
МоделСист – Моделирование процессов и систем;
ИнстрСрИС – Инструментальные средства ИС;
ЭконКул – Экономическая культура и финансовая грамотность;
ОснПрофКор – Основы профилактики коррупции;
3DМодел – Трёхмерное моделирование и анимация;
РазрВебПрил – Разработка Web-приложений;
БизМедиа – Бизнес-процессы в медиаиндустрии;
ОбрабМедиа1 – Обработка медиаконтента, часть 1;
ОбрабМедиа2 – Обработка медиаконтента, часть 2;
ПолигрПроц – Полиграфический процесс;
ПроГМедиа – Программные средства медиаиндустрии;
ГрафДизайн – Графический дизайн интерфейса;
Фил – Философия;
ИстРос – История России;
ВсеобИст – Всеобщая история;
ИняЗ – Иностранный язык;
БЖД – Безопасность жизнедеятельности;
Физ – Физика;
Инф – Информатика;
ОснПроГ – Основы программирования;
ВведПроф – Введение в профессиональную деятельность;
АлгГеом – Алгебра и геометрия;
МатАн – Математический анализ;
ДискрМат – Дискретная математика;
ТерВер – Теория вероятности и математическая статистика;

ТПЭРО – Теория и практика эффективного речевого общения;
ТехПроГ – Технологии программирования;
МетСрИС – Методы и средства проектирования ИС и технологий;
ОС – Операционные системы;
ФизКульТ – Физическая культура и спорт;
СДЗЗ – Системы дистанционного зондирования Земли;
РаспрИС – Распределенные ИС;
СпортПроГ – Спортивное программирование;
ЭконПред – Экономика предприятия;
ЦифрБизнМод – Цифровые бизнес-модели;
МоделБизнПроц – Моделирование бизнес-процессов;
ЦифрУпр – Цифровое управление;
ТехАналЦифрРын – Технологии анализа цифровых рынков;
АрхЦифрПред – Архитектура цифрового предприятия;
ДинМоделПроизвПроц – Динамическое моделирование производственных процессов;
ЦифрПроизв – Цифровое производство;
ДеловИняЗ – Деловой иностранный язык;
РаспрБДБлокчейн – Распределенные базы данных и технологии блокчейн;
ПрактМоделОБ – Практикум: моделирование и оптимизация бизнес-процессов;
УпрЦифрАктив – Управление цифровыми активами;
КиберБезопас – Кибербезопасность;
ВебПроГДизайн – Web-программирование и компьютерный дизайн;
ПрактРазрабЦифрПрод – Практикум: разработка цифрового продукта;
БизнСрПрил – Бизнес-приложения;
СетевТехИнтернетВещ – Сетевые технологии и интернет вещей;
ТренингЭффКом – Тренинг «Эффективные коммуникации»;
СисИТМонитор – Системы ИТ-мониторинга социально-экономического развития;
ВССИТ – Вычислительные системы, сети и телекоммуникации;
СисАнализ – Системный анализ;
ПроГ – Программирование;
ИСИТ – Информационные системы и технологии;
ВышМат – Высшая математика;
ЭффКом – Эффективная коммуникация;
ИБиЗИ – Информационная безопасность и защита информации;
Право – Право;
ПроектИС – Проектирование ИС;
ОснПроектМен – Основы проектного менеджмента;
БД – Базы данных;
МакрЭкон – Макроэкономика;
Эконометр – Эконометрика;
ТехнРазрабПО – Технология разработки ПО

Таблица 3. Генерируемая программой таблица агрегированных данных УП бакалавриата 1 курса

Название	Количество по выбору	Максимальный вес ребра	Минимальный вес ребра	Диаметр графа	Коэффициент кластеризации	1 квартиль	2 квартиль	3 квартиль	4 квартиль	Несвязанные вершины
01.03.04.30	0	0.371	<i>0.087</i>	0.371	1.000	9	<u>9</u>	5	1	67
09.03.01.30	0	0.341	0.091	0.614	0.805	3	6	7	7	55
09.03.02.30	0	0.338	0.090	0.338	1.000	2	3	3	0	70
09.03.03.32	0	0.461	0.092	0.461	0.000	3	2	0	2	71
09.03.03.31	0	0.459	0.092	0.459	0.000	3	2	0	2	71
09.03.03.33	0	0.446	0.089	<u>0.692</u>	0.333	4	2	4	7	61
09.03.03.35	0	0.439	0.088	0.439	0.000	3	2	0	2	71
09.03.04.30	0	0.369	0.099	0.591	0.800	2	4	1	5	66
10.03.01.31	0	0.376	<u>0.111</u>	0.376	1.000	<i>1</i>	4	2	1	70
15.03.04.32	<u>27</u>	<u>0.766</u>	0.106	0.468	0.917	<u>10</u>	4	<u>13</u>	<u>12</u>	<u>39</u>
27.03.03.30	11	0.670	0.089	0.580	0.882	3	3	4	8	60
27.03.04.30	<i>3</i>	<i>0.332</i>	0.088	<i>0.331</i>	1.000	2	4	4	0	68
Медиана	11	0.439	0.091	0.461	0.882	3	4	4	2	68
Мода	0	–	0.089	–	1.000	3	3	2	2	71
Усеченное среднее	13.667	0.447	0.094	0.477	0.645	3	3	3	3	64

Другими вычисляемыми *SPA-SFU2* данными являются процентные распределения ЗЕ, отводящихся на формирование групп компетенций (в ФГОС ВО⁹ определены 3 группы компетенций: универсальные, общепрофессиональные и профессиональные). С их помощью можно понять, какой группе компетенций отдается приоритет, а также то, насколько профильным является направление подготовки, которому соответствует УП.

Для выявления отклонений в УП от их усредненного варианта по всей выборке УП по каждой метрике подсчитываются меры центральной тенденции (по каждому параметру УП *SPA-SFU2* рассчитывает максимальное и минимальное значения, моду, медиану и среднее значение), позволяющие определить наиболее отличающийся УП на фоне остальных. В табл. 3 представлены метрики графовой модели УП бакалавриата 2021 г. начала подготовки с учетом только 1 курса обучения. Как можно заметить, только у двух УП имеются дисциплины по выбору на первом году обучения.

Также можно заметить, что у УП 09.03.03.31 «Интернет технологии и мобильные приложения» в качестве глобального коэффициента кластеризации указан нуль (табл. 3, столбец 6 «Коэффициент

кластеризации»), что означает, что никакие три УЕ не формируют одинаковую компетенцию на первом году обучения. В столбцах 8–11 указано квартильное распределение длин минимальных расстояний между всеми парами вершин. Фактически, все расстояния всех УП исследования (10 УП бакалавриата) объединены в один массив, отсортированы, и каждое значение соотносено одному из 4 квартилей. К первому квартилю относятся пары вершин, между которыми относительно небольшое расстояние в графовой модели, а к четвертому – наоборот. Ситуация, когда между вершинами нет маршрута, относится к группе «Несвязанные вершины».

Как можно видеть в табл. 3, по каждой вычисленной мере определены минимальные и максимальные значения, а также другие меры центральной тенденции. Процент усечения среднего значения задается в конфигурационном файле программы (рис. 2, строка 15). Если в ячейке указан прочерк, значит, у значения отсутствует информативность (например, если все значения одинаковые или все значения разные, то значение моды не указывается). Уникальные максимальные значения выделены подчеркиванием, минимальные – выделены курсивом. Также у всех значений сокращено количество знаков после запятой для большей наглядности. Из табл. 3 также видно, что на фоне остальных выделяется УП 15.03.04.32 «Автоматизация технологических

⁹ <https://www.fgosvo.ru/news/view/5720>. Дата обращения 28.09.2025. / Accessed September 28, 2025. (In Russ.).

```
1 Компетенции(2) [строка 61] : В учебном плане
2 R:/grad_sfu/2703040030_op-21.plm.plx.xlsx не указаны компетенции у дисциплины
  с индексом В2.В
3 - Учебный план R:/grad_sfu/2703040030_op-21.plm.plx.xlsx обработан с недочетами
4
5 - В учебном плане R:/grad_sfu/2703040030_op-21.plm.plx.xlsx не найдена дисциплина
  с индексом ОПК-7 (1)
```

Рис. 6. Фрагмент генерируемого программой лог-файла

процессов и производств» (строка серого цвета), т.к. в его метриках наиболее часто присутствуют минимальные и максимальные значения относительно всех анализируемых УП бакалавриата. Оказалось, что данный УП действительно имеет свои особенности, например, это единственный УП, в рамках которого преподают УЕ «Химия» и УЕ «Экология» в рамках всех направлений подготовки института в области информационных технологий.

Также для помощи пользователю *SPA-SFU2* в нахождении спорных моментов формата заполнения УП генерируется лог-файл (рис. 6), в котором указаны особенности обработки УП и возникшие в его процессе недочеты. Так, например, посредством анализа ошибок, сгенерированных лог-файлом, обнаружено, что в УП 27.03.04 «Управление в технических системах» ОПК-7 формируется только за счет практик (цифра 1), которые исключены из анализа, т.к. для них определена в качестве формируемых вся совокупность компетенций УП.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка качества ОП (подробно о качестве [18]) в контексте эффективности достижения образовательных результатов представляет собой сложную многофакторную задачу, привлекающую внимание как академических исследователей, так и разработчиков коммерческих образовательных платформ [19]. Например, трудности могут быть связаны с неоднозначностью критериев оценивания ОП, в частности, высокой вариативностью процента распределения трудоемкости формирования различных групп компетенций на разных этапах обучения.

В качестве начального этапа оценки качества ОП предлагается рассматривать задачу исследования УП с точки зрения анализа состава и структуры ОП. При этом традиционные методы оценки УП (экспертные оценки, табличные сравнения) не столь эффективны, как программные методы, из-за субъективности мнений [20], невозможности проанализировать большое количество УП за ограниченный срок, ошибок выполнения анализа и т.п. В связи с этим разработка программных инструментов поддержки анализа УП, как первого шага оценки качества ОП, представляется актуальной задачей.

Рекомендуется для принятия решений по модернизации УП, применению полученного опыта при создании новых УП и ОП использовать представленные в работе программные методы, которые выражены в следующих действиях:

- 1) предобработка: приведение данных к единому формату для удобства их дальнейшего использования и расширения возможностей их обработки;
- 2) обработка: извлечение из всей совокупности данных, получаемых из *Excel*-таблицы ИС «Планы», тех данных, которые необходимы для дальнейшего анализа интересующих исследователя характеристик;
- 3) анализ: вычисление агрегированных данных на основе полученных при обработке, например, тех, которые явно указывают на особенности УП;
- 4) визуализация: отображение полученных при анализе данных в удобной для исследователя форме представления для оперативного и точного принятия решения на их основе [21].

Обратим внимание на проблемы внедрения таких программных инструментов, связанные с уточнением характеристик УП, их калибровкой на основе экспертного мнения и определением их связи с другими характеристиками обучения по ОП, например, сохранностью контингента, процентом трудоустройства выпускников и пр. Программные методы, предложенные в работе, полезны для решения вышеописанных проблем и способствуют развитию автоматизированных инструментов для принятия решений на основе данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены программные методы обработки, анализа и визуализации УП, реализация которых осуществлена в программном комплексе *SPA-SFU2*. С его помощью удается с минимальными затратами сравнить УП между собой, определить их особенности по числовым характеристикам и найти причины сильного отклонения этих характеристик от среднего значения. *SPA-SFU2* явно указывает на проблемные места УП для принятия решения об их исправлении, помогает определить возможные

недочеты УП, разобраться в получившейся компетентностной составляющей и определить неявные закономерности содержащихся в них данных.

Визуализация УП посредством *SPA-SFU2* позволяет быстрее и точнее понимать внутреннюю структуру УП и ее характерные отличия. *SPA-SFU2* может быть полезен для демонстрации абитуриентам, обучающимся и преподавателям характеристик УП, например, процентного распределения на группы компетенций или демонстрации визуализаций взаимосвязей УЕ посредством графового представления.

Возможно использовать *SPA-SFU2* при создании новых УП, обеспечивающих оптимизацию планируемого учебного процесса, формирование которых основано на сравнительном анализе с другими УП по смежным направлениям подготовки, что обеспечивает их уникальность и эффективность.

Программный комплекс для анализа УП *SPA-SFU2* является необходимым звеном для разработки ИС комплексной учебной аналитики и может служить элементом цифровой экосистемы вуза.

На данный момент программный комплекс *SPA-SFU2*, представленный в настоящем исследовании, не является полностью автоматизированным, из-за чего принятие решений на основе полученных им характеристик требует мнения эксперта. Данную проблему возможно решить внедрением в *SPA-SFU2* подходов, связанных с моделированием искусственного интеллекта (применение нейронных сетей или имитация искусственного интеллекта путем накопления сценариев поведения в заранее указанных ситуациях).

В перспективе для полной автоматизации обработки, анализа и визуализации УП, а также большего

охвата их полезных характеристик, планируется решить следующие задачи в указанной очередности:

- 1) получить и сопоставить сведения, внешние по отношению к ОП (например, данные об успеваемости обучающихся, результаты анкетирования и сведения о трудоустройстве выпускников), с полученными и подсчитанными *SPA-SFU2* характеристиками УП;
- 2) внедрить сложные цифровые решения, основанные на принципах искусственного интеллекта и обработки больших данных;
- 3) отыскать иные способы визуализации характеристик УП для демонстрации их особенностей, не представленных в исследовании.

Вклад авторов

Е.А. Халтурин – разработка методологии исследования, подготовка первоначального варианта рукописи, обзор литературы, редактирование текста рукописи, разработка и представление программных методов.

А.А. Кытманов – общее руководство, создание концепции исследования, постановка проблемы исследования, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование текста рукописи.

Ю.В. Вайнштейн – обсуждение результатов исследования, редактирование текста рукописи.

Т.В. Зыкова – формальный анализ, практическое использование результатов исследования.

Authors' contributions

E.A. Khalturin – methodology, original draft preparation, review and editing, presenting software methods.

A.A. Kytmanov – supervision, conceptualization writing, research problem, original draft preparation and editing.

Yu.V. Vaynshteyn – discussion, editing.

T.V. Zykova – formal analysis, practical application.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королькова И.А., Зайцев С.А. Современные факторы, влияющие на формирование ИТ компетенций у обучающихся. В сб.: *Цифровая трансформация социальных и экономических систем: материалы международной научно-практической конференции*. М.: Московский университет им. С.Ю. Витте. 2023. С. 264–268. <https://www.elibrary.ru/qbzuya>
2. Ширинкина Е.В. Методы интеллектуального анализа данных и образовательной аналитики. *Современное образование*. 2022;1:51–67. <https://www.elibrary.ru/dinnow>, <https://doi.org/10.25136/2409-8736.2022.1.37582>
3. Kustitskaya T.A., Esin R.V., Kytmanov A.A., Zykova T.V. Designing an Education Database in a Higher Education Institution for the Data-Driven Management of the Educational Process. *Education Sciences*. 2023;13(9):947. <https://www.elibrary.ru/jnyekv>, <https://doi.org/10.3390/educsci13090947>
4. Jarke J., Breiter A. Editorial: The datafication of education. *Learning, Media and Technology*. 2019;44(1):1–6. <https://doi.org/10.1080/17439884.2019.1573833>
5. Hartong S., Piattoeva N. Contextualizing the datafication of schooling – a comparative discussion of Germany and Russia. *Critical Studies in Education*. 2021;62(2):227–242. <https://doi.org/10.1080/17508487.2019.1618887>
6. Pangrazio L., Selwyn N., Cumbo B. Tracking technology: exploring student experiences of school datafication. *Cambridge J. Education*. 2023;53(6):847–862. <https://doi.org/10.1080/0305764X.2023.2215194>
7. Nouraey P., Al-Badi A., Riasati M.J., Maata R.L. Educational program and curriculum evaluation models: a mini systematic review of the recent trends. *Universal J. Educational Res*. 2020;8(9):4048–4055. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.080930>
8. McCarthy A., Maor D., McConney A., Cavanaugh C. Digital transformation in education: Critical components for leaders of system change. *Social Sciences & Humanities Open*. 2023;8(1):100479. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100479>

9. Кузьмина Е.А., Низамова Г.Ф. Формирование учебного плана на основе графовой модели. *Информатика и образование*. 2020;4(5):33–43. <https://www.elibrary.ru/erhqxo>, <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2020-35-5-33-43>
10. Агеев Ю.Д., Федосеев С.В., Кавин Ю.А., Ворона С.Г., Павловский И.С. Оценка противоречивости логической структуры учебного плана. *Статистика и экономика*. 2018;5:73–80. <https://www.elibrary.ru/vpnnbq>, <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2018-5-73-80>
11. Зыкова Т.В., Кытманов А.А., Халтурин Е.А., Вайнштейн Ю.В., Носков М.В. Алгоритм анализа и оценки учебных планов образовательных программ. *Информатика и образование*. 2024;39(1):52–64. <https://www.elibrary.ru/unswxg>, <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2024-39-1-52-64>
12. Борзова А.С. Оптимизация компонентов содержания обучения в области эксплуатации воздушного транспорта на основе экспертного анализа с ориентацией на модель-ориентированный подход. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017;3(18):14. <https://www.elibrary.ru/zrcvvd>. URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/08/Borzova_3_1_17.pdf. Дата обращения 28.09.2025.
13. Курилова О.Л. Применение генетического алгоритма для оптимизации учебного плана. *Информационно-управляющие системы*. 2013;3(64):84–92. <https://www.elibrary.ru/qbpgth>
14. Дёмина А.Р., Юдин Е.Б. Расчет коэффициента кластеризации неполной сети с использованием параллельных вычислений. *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. 2015;3:45–48. <https://www.elibrary.ru/uzeonx>
15. Hitchman S. The details of conceptual modelling notations are important – a comparison of relationship normative language. *Communications of the Association for Information Systems*. 2002;9(1):10. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.00910>
16. Губин А.С., Тутова Н.В. Анализ подхода к разработке приложений с «чистой» архитектурой. *Телекоммуникации и информационные технологии*. 2022;9(1):28–37. <https://www.elibrary.ru/nozmkq>
17. Кытманов А.А., Горелова Ю.Н., Зыкова Т.В., Пихтилькова О.А., Пронина Е.В. Концептуальный подход к цифровой трансформации образовательного процесса в вузе. *Russian Technological Journal*. 2024;12(5):98–110. <https://elibrary.ru/WAZLGB>, <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-98-110>
18. Корчак А.Э., Хавенсон Т.Е. Понятие «качество» в высшем образовании: от офлайн к онлайн-формату. *Высшее образование в России*. 2024;33(1):9–27. <https://elibrary.ru/WAZLGB>, <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2024-33-1-9-27>
19. Manolev J., Sullivan A., Slee R. The datafication of discipline: ClassDojo, surveillance and a performative classroom culture. In: *The Datafication of Education*. Routledge; 2020. P. 37–52. <https://doi.org/10.1080/17439884.2018.1558237>
20. Williamson B., Bayne S., Shay S. The datafication of teaching in Higher Education: critical issues and perspectives. *Teaching in Higher Education*. 2020;25(4):351–365. <https://doi.org/10.1080/13562517.2020.1748811>
21. Зыкова Т.В., Кытманов А.А., Носков М.В., Халтурин Е.А. Применение силового алгоритма визуализации графов для анализа учебных планов образовательных программ высшего образования. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2023;19(1):104–116. <https://elibrary.ru/kzhowj>, <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.104-116>

REFERENCES

1. Korolkova I.A., Zaytsev S.A. Modern factors of influence on IT education. In: *Digital Transformation of Social and Economic Systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Moscow: Moscow Witte University. 2023. P. 264–268 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/qbzuya>
2. Shirinkina E.V. Methods of data mining and educational analytics. *Sovremennoe obrazovanie = Modern Education*. 2022;1:51–67 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/dinnow>, <https://doi.org/10.25136/2409-8736.2022.1.37582>
3. Kustitskaya T.A., Esin R.V., Kytmanov A.A., Zykova T.V. Designing an Education Database in a Higher Education Institution for the Data-Driven Management of the Educational Process. *Education Sciences*. 2023;13(9):947. <https://www.elibrary.ru/jnyekv>, <https://doi.org/10.3390/educsci13090947>
4. Jarke J., Breiter A. Editorial: The datafication of education. *Learning, Media and Technology*. 2019;44(1):1–6. <https://doi.org/10.1080/17439884.2019.1573833>
5. Hartong S., Piattoeva N. Contextualizing the datafication of schooling – a comparative discussion of Germany and Russia. *Critical Studies in Education*. 2021;62(2):227–242. <https://doi.org/10.1080/17508487.2019.1618887>
6. Pangrazio L., Selwyn N., Cumbo B. Tracking technology: exploring student experiences of school datafication. *Cambridge J. Education*. 2023;53(6):847–862. <https://doi.org/10.1080/0305764X.2023.2215194>
7. Nouraey P., Al-Badi A., Riasati M.J., Maata R.L. Educational program and curriculum evaluation models: a mini systematic review of the recent trends. *Universal J. Educational Res.* 2020;8(9):4048–4055. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.080930>
8. McCarthy A., Maor D., McConney A., Cavanaugh C. Digital transformation in education: Critical components for leaders of system change. *Social Sciences & Humanities Open*. 2023;8(1):100479. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100479>
9. Kuzmina E.A., Nizamova G.F. Curriculum development based on the graph model. *Informatika i obrazovanie = Informatics and Education*. 2020;4(5):33–43 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/erhqxo>, <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2020-35-5-33-43>
10. Ageev Yu.D., Fedoseev S.V., Kavin Yu.A., Vorona S.G., Pavlovskiy I.S. Inconsistency evaluation of the curriculum logical structure. *Statistika i ekonomika = Statistics and Economics*. 2018;5:73–80 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vpnnbq>, <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2018-5-73-80>
11. Zykova T.V., Kytmanov A.A., Khalturin E.A., Vaynshteyn Y.V., Noskov M.V. Algorithm for analysis and evaluation of educational programs curricula. *Informatika i obrazovanie = Informatics and Education*. 2024;39(1):52–64 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/unswxg>, <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2024-39-1-52-64>

12. Borzova A.S. Optimization of training components in the field of operation of air transport on the basis of expert analysis with orientation on the model-oriented approach. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2017;3(18):14 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/zrcvvd>. Available from URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/08/Borzova_3_1_17.pdf. Accessed September 28, 2025.
13. Kurilova O.L. Application of genetic algorithm for curriculum optimization. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2013;3(64):84–92 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/qbpgth>
14. Demina A.R., Yudin E.B. Calculation of the clustering coefficient of an incomplete network using parallel computing. *Rossiia molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost' = Young Russia: Advanced Technology – in the Industry*. 2015;3:45–48 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/uzeonx>
15. Hitchman S. The details of conceptual modelling notations are important – a comparison of relationship normative language. *Communications of the Association for Information Systems*. 2002;9(1):10. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.00910>
16. Gubin A.S., Toutova N.V. Analysis of the approach to developing applications with a “clean” architecture. *Telekommunikatsii i informatsionnye tekhnologii = Telecommunications and Information Technology*. 2022;9(1):28–37 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/nozmkq>
17. Kytmanov A.A., Gorelova Yu.N., Zykova T.V., Pikhtilkova O.A., Pronina E.V. A conceptual approach to digital transformation of the educational process at a higher education institution. *Russian Technological Journal*. 2024;12(5):98–110. <https://elibrary.ru/WAZLGB>, <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-98-110>
18. Korchak A.E., Khavenson T.E. Concept of “quality” in higher education: from offline to online mode. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2024;33(1):9–27 (in Russ.). <https://elibrary.ru/WAZLGB>, <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2024-33-1-9-27>
19. Manolev J., Sullivan A., Slee R. The datafication of discipline: ClassDojo, surveillance and a performative classroom culture. In: *The Datafication of Education*. Routledge; 2020. P. 37–52. <https://doi.org/10.1080/17439884.2018.1558237>
20. Williamson B., Bayne S., Shay S. The datafication of teaching in Higher Education: critical issues and perspectives. *Teaching in Higher Education*. 2020;25(4):351–365. <https://doi.org/10.1080/13562517.2020.1748811>
21. Zykova T.V., Kytmanov A.A., Noskov M.V., Khalturin E.A. Application of a force-directed graph drawing algorithm for the analysis of curricula of educational programs of higher education. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(1):104–116 (in Russ.). <https://elibrary.ru/kzhowj>, <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.104-116>

Об авторах

Халтурин Евгений Александрович, старший преподаватель, кафедра информационных систем, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, пр-т Свободный, д. 79). E-mail: ekhalturin97@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 5324-8252, <https://orcid.org/0000-0001-9292-0370>

Кытманов Алексей Александрович, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kytmanov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602129708, SPIN-код РИНЦ 6866-6079, <https://orcid.org/0000-0003-3325-099X>

Вайнштейн Юлия Владимировна, д.пед.н., профессор, кафедра прикладной математики и анализа данных, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, пр-т Свободный, д. 79). E-mail: yweinstein@sfu-kras.ru. Scopus Author ID 57205328429, SPIN-код РИНЦ 9765-2130, <https://orcid.org/0000-0002-8370-7970>

Зыкова Татьяна Викторовна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра прикладной математики и анализа данных, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, пр-т Свободный, д. 79). E-mail: tzykova@sfu-kras.ru. Scopus Author ID 57188699496, SPIN-код РИНЦ 1959-9769, <https://orcid.org/0000-0002-7332-2372>

About the Authors

Evgenii A. Khalturin, Senior Lecturer, Department of Information System, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041 Russia). E-mail: ekhalturin97@yandex.ru. RSCI SPIN-code 5324-8252, <https://orcid.org/0000-0001-9292-0370>

Alexey A. Kytmanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of the Higher Mathematics Department – 3, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kytmanov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602129708, RSCI SPIN-code 6866-6079, <https://orcid.org/0000-0003-3325-099X>

Yuliya V. Vaynshteyn, Dr. Sci. (Education), Professor, Department of Applied Mathematics and Data Science, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79, Svobodnyi pr., Krasnoyarsk, 660041 Russia). E-mail: yweinstein@sfu-kras.ru. Scopus Author ID 57205328429, RSCI SPIN-code 9765-2130, <https://orcid.org/0000-0002-8370-7970>

Tatiana V. Zykova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Data Science, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79, Svobodnyi pr., Krasnoyarsk, 660041 Russia). E-mail: tzykova@sfu-kras.ru. Scopus Author ID 57188699496, RSCI SPIN-code 1959-9769, <https://orcid.org/0000-0002-7332-2372>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391: 621.396: 621.373
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-57-68>
EDN XPSWYV



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Формирование радиовизионных сигналов спектральной сатурацией в режиме переходных искажений интегральных сверхвысокочастотных усилителей для систем распознавания жестов

К.В. Латышев[®], М.С. Костин, К.А. Бойков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: latyshev@mirea.ru

• Поступила: 17.06.2025 • Доработана: 29.09.2025 • Принята к опубликованию: 09.02.2026

Резюме

Цели. Цель работы – исследование механизмов нелинейного формирования широкополосного импульсного спектра в условиях перегрузки в сверхширокополосных (СШП) усилительных цепях для решения задач радиовизионного распознавания жестов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности и помехоустойчивости современных радиовизионных СШП-систем для жестикулярных интерфейсов управления.

Методы. Используются методы статистической радиофизики, частотно-временные методы вейвлет-преобразования радиоизображений, методы теории S-параметрического векторного анализа схем, методы программно-численного моделирования.

Результаты. Представлен метод генерации СШП-сигналов в сверхвысокочастотном диапазоне, основанный на управляемых нелинейных искажениях сигнала. Показано, что при переводе усилителя в режим насыщения формируется сигнал с резкими фронтами, обладающий широким энергетическим спектром. Построен лабораторный стенд киберфизической интерференционной радиосенсорной системы распознавания жестов и исследованы его характеристики. Исследованы свойства полученных импульсов в задачах радиовизионного управления. Экспериментально показана эффективность предложенного метода для задач радиовизионного распознавания жестов.

Выводы. Предложен метод нелинейной сатурации – синтеза спектра радиовизионных сигналов, основанный на явлениях переходных искажений в СШП-усилителях. Показано, что интерференционный режим при расширении исходной полосы частот до 900 МГц способен обеспечить повторяемость фазовых изображений не менее 0.94. Установлено, что в перегруженном по входу режиме усилителя типа SBB5089Z¹ при задающем низкомодовом гармоническом возбуждении на переходной частоте 47 МГц в каскадной схеме усиления на выходе радиовизионной антенны удается получить сигнал с измененным спектром. При этом управляемое

¹ Высоколинейный широкополосный монолитный (monolithic microwave integrated circuit – монолитная микроволновая интегральная схема) усилитель, разработанный компанией Qorvo, США. [High-linearity wideband, monolithic microwave integrated circuit (MMIC) amplifier was developed by Qorvo, USA.]

формирование спектра возбуждения антенны для каждого из усилительных модулей определяется уникальной импульсной характеристикой интегрального СШП-усилителя. Это позволило успешно применить такие усилители при решении задач радиовизионного распознавания жестов. Предложенная методика позволяет использовать стандартные СШП-усилители для создания компактных источников СШП-сигналов без усложнения схемотехники.

Ключевые слова: радиовизионный сигнал, сатурация спектра, переходные искажения, сверхширокополосный усилитель, идентификация жестов, киберфизический стенд

Для цитирования: Латышев К.В., Костин М.С., Бойков К.А. Формирование радиовизионных сигналов спектральной сатурацией в режиме переходных искажений интегральных сверхвысокочастотных усилителей для систем распознавания жестов. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):57–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-57-68>, <https://www.elibrary.ru/XPSWV>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Generation of radiovision signals by spectral saturation in transient distortion mode of integral microwave amplifiers for gesture recognition systems

Kirill V. Latyshev[@], Mihail S. Kostin, Konstantin A. Boikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: latyshev@mirea.ru

• Submitted: 17.06.2025 • Revised: 29.09.2025 • Accepted: 09.02.2026

Abstract

Objectives. The paper aims to investigate the mechanisms of the nonlinear formation of a wideband pulse spectrum under overload conditions in ultra-wideband (UWB) amplifier circuits in resolving problems related to radiovision gesture recognition. The relevance of the study stems from the need to enhance the accuracy and noise immunity of modern radiovision UWB systems for gestural control interfaces.

Methods. The study used statistical radiophysics, time-frequency methods of wavelet transformation of radio images, the theory of S-parametric vector analysis of circuits, and software-numerical modeling.

Results. The method for generating UWB signals in the microwave range based on controlled nonlinear signal distortion is presented. When the amplifier is switched to the saturation mode, a signal with sharp fronts is formed with a wide energy spectrum. A laboratory setup of a cyber-physical system for gesture recognition using radio sensing was developed, and its characteristics were investigated. The properties of the pulses generated in radiovision control systems were also studied. The effectiveness of the proposed approach for the tasks of radiovision gesture recognition was experimentally demonstrated.

Conclusions. A method of nonlinear saturation-synthesis of the spectrum of radiovision signals based on transient distortion phenomena in UWB amplifiers is proposed. It was shown that, when the initial frequency band is expanded up to 900 MHz, the interference mode can provide phase image repeatability of at least 0.94. It was also established that in the input overloaded mode of the SBB5089Z² type amplifier with low-mode harmonic excitation at a transition frequency of 47 MHz in a cascade amplification scheme, a signal with a modified spectrum can be obtained

² High-linearity wideband, monolithic microwave integrated circuit (MMIC) amplifier was developed by Qorvo, USA.

at the output of the radio antenna. In this case, the controlled formation of the antenna excitation spectrum for each amplifier module is determined by means of the unique impulse characteristic of the integrated UWB-amplifier. This allows for the successful application such amplifiers in resolving problems related to radiovision gesture recognition. The methodology proposed allows the use of standard UWB amplifiers to create compact sources of UWB signals without the complication of circuitry.

Keywords: radiovision signal, spectrum saturation, transient distortion, ultra-wideband amplifier, gesture recognition, cyber-physical stand

For citation: Latyshev K.V., Kostin M.S., Boikov K.A. Generation of radiovision signals by spectral saturation in transient distortion mode of integral microwave amplifiers for gesture recognition systems. *Russian Technological Journal*. 2026; 14(2):57–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-57-68>, <https://www.elibrary.ru/XPSWV>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиосенсорные системы ближнего киберфизического мониторинга используются для динамической идентификации жестов человека в таких сферах как смарт-медицина, промышленная автоматизация и виртуальная/дополненная реальность. Высокие требования к их надежности и разрешающей способности стимулируют поиск новых методов формирования и обработки радиовизионных сигналов [1, 2], что обуславливает актуальность исследования.

В работе предлагается оригинальный подход к спектральному синтезу таких систем. Вместо традиционных высоковольтных формирователей используется сверхширокополосный (СШП) усилитель, работающий в режиме преднамеренной перегрузки. В этом режиме он действует как нелинейный синтезатор, где для расширения спектра сигнала (спектральной сатурации) целенаправленно используются переходные нелинейные искажения, которые обычно считаются нежелательным эффектом. Новизна исследования заключается именно в этом преднамеренном применении нелинейных эффектов для управляемого расширения спектра.

Механизм сатурации обусловлен работой выходных транзисторов усилителя в режиме насыщения. При этом исходный сигнал преобразуется в импульсную форму, близкую к прямоугольной, с очень резкими фронтами, что и обеспечивает синтез широкополосного спектра, используемого в СШП-системах [3, 4]. Расширение спектра позволит увеличить разрешающую способность радиосенсорной системы, повысить устойчивость к узкополосным помехам и повысить точность временной и пространственной локализации жеста.

Статья представляет теоретические, модельные и экспериментальные исследования этого метода нелинейного спектропреобразования для задачи распознавания жестов радиовизионными методами.

2. МОДЕЛЬ СИНТЕЗА ШИРОКОПОЛОСНОГО СПЕКТРА РАДИОВИЗИОННОГО СИГНАЛА, ОСНОВАННАЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В СШП-УСИЛИТЕЛЕ

Нелинейное формирование спектра радиовизионного сигнала происходит при работе усилительных СШП-каскадов в режиме перегрузки за счет возникновения переходных искажений, аналитически описанных в работе [5] при анализе эквивалентной схемы СШП-каскада с индуктивной коррекцией (рис. 1).

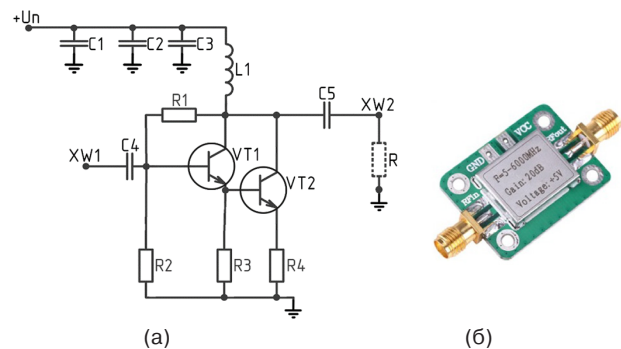


Рис. 1. СШП-усилитель SBB5089Z³ с индуктивной коррекцией:

(а) принципиальная схема, (б) внешний вид. Обозначения элементов схемы соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81⁴

³ Высоколинейный широкополосный монокристаллический (monolithic microwave integrated circuit – монокристаллическая микроволновая интегральная схема) усилитель, разработанный компанией Qorvo, США. [High-linearity wideband, monolithic microwave integrated circuit (MMIC) amplifier was developed by Qorvo, USA.]

⁴ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. *Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.* М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. *Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams.* Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

В работе используется монолитный СШП-усилитель типа SBB5089Z на основе InGaP HBT⁵-транзисторов, использующий конфигурацию Дарлингтона со схемой активного смещения.

В момент формирования входного низкомодового сигнала СШП-усилитель работает в режиме преднамеренной перегрузки. В его выходной цепи дроссель L1 с индуктивностью L препятствует быстрому нарастанию тока через нагрузочный резистор R, который является эквивалентом входного сопротивления R последующего каскада. Это приводит к временному накоплению энергии в паразитных емкостях каскада (эквивалентная емкость C) и элементах печатной платы, что замедляет переходные процессы в начальной фазе сигнала. По мере накопления энергии в дросселе L1 эквивалентная емкость C успевает зарядиться до уровня напряжения, превышающего порог открытия составного транзисторного каскада VT1–VT2. В результате происходит резкое переключение транзисторов в режим насыщения, что формирует импульс с крутыми фронтами и широким спектром – необходимое условие для генерации СШП-сигналов.

Коэффициент усиления сигнала в операторной форме можно представить следующим образом [5]:

$$K(p) = S \frac{(pL + R) \frac{1}{pC}}{pL + R + \frac{1}{pC}} = S \frac{pL + R}{1 + pRC + p^2LC},$$

где p – оператор Лапласа, S – крутизна составного транзисторного каскада Дарлингтона.

Пусть коэффициент усиления на низких частотах $K_0 = SR$, постоянная времени эквивалентного контура $\tau_{bas} = RC$, $m = L/CR^2 = (L/R)/CR$ – параметр коррекции. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{K(p)}{K_0} &= \frac{1 + p\tau_{bas}m}{1 + p\tau_{bas} + p^2m\tau_{bas}^2} = \\ &= \frac{1}{\tau_{bas}} \cdot \frac{p + \frac{1}{m\tau_{bas}}}{p^2 + \frac{1}{m\tau_{bas}}p + \frac{1}{m\tau_{bas}^2}}. \end{aligned}$$

Следовательно, сигнал в операторной форме на выходе СШП-каскада с индуктивной коррекцией в перегруженном по входу режиме можно представить как [5]:

$$\frac{U(p)}{K_0} = \frac{1}{\tau_{bas}} \cdot \frac{p + \frac{1}{m\tau_{bas}}}{p \left(p^2 + \frac{1}{m\tau_{bas}}p + \frac{1}{m\tau_{bas}^2} \right)}.$$

Характер переходного процесса определяется корнями характеристического уравнения системы, которые вычисляются по формуле [5]:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2m\tau_{bas}} \pm \frac{1}{2m\tau_{bas}} \sqrt{4m - 1}.$$

При $m > 0.25$, что соответствует в области переходных частот условию формирования переходных осцилляций с выбросом при мгновенном открытии составного каскада VT1–VT2 (рис. 2а), нормированная передаточная функция СШП-усилителя будет иметь вид [5]:

$$\frac{h(t)}{K_0} = 1 - \frac{2m}{\sqrt{4m - 1}} e^{-\frac{t}{2m\tau_{bas}}} \sin \left(\frac{\sqrt{4m - 1}}{2m\tau_{bas}} t + \theta \right),$$

где $\theta = \pi - \arcsin \frac{\sqrt{4m - 1}}{2m}$, t – время.

При этом переходный процесс представляет собой затухающие колебания с выбросом, величина которого зависит от коэффициента коррекции m .

Для $m = 1$ (рис. 2б), что соответствует условию свободных осцилляций на выходе СШП-усилителя, выражение для передаточной функции будет иметь вид [5]:

$$\frac{h(t)}{K_0} = 1 - e^{-\frac{t}{2RC}} \left(\cos \left(\frac{\sqrt{3}t}{2RC} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \left(\frac{\sqrt{3}t}{2RC} \right) \right).$$

Таким образом, в области переходных частот передаточной характеристики СШП-усилителя, который можно представить как модель активного полосового фильтра второго порядка, формируется переходной процесс, соответствующий свободным осцилляциям.

За время ζ при $f_1 > f_2$ система успевает совершить цикл свободных колебаний (рис. 2а), что приводит к формированию на выходе СШП-усилителя затухающего радиоимпульса, который далее усиливается идентичным каскадом. При этом радиоимпульс имеет экспоненциальное затухание и формируется в соответствии с импульсной характеристикой системы, а выбор частоты f_1 низкомодового возбуждения, соответствующей переходной области частот, определяется условиями достижения параметра коррекции $m = 1$. Частота f_2 соответствует линейному усилению сигнала.

Следует заметить, что перегрузка входа СШП-усилителя по определенной частоте может удовлетворять условию самовозбуждения Баркгаузена [6]:

⁵ InGaP (indium gallium phosphide) – индий-галлий-фосфид; HBT (heterojunction bipolar transistor) – гетеропереходный биполярный транзистор. [InGaP is indium gallium phosphide and HBT is a heterojunction bipolar transistor.]

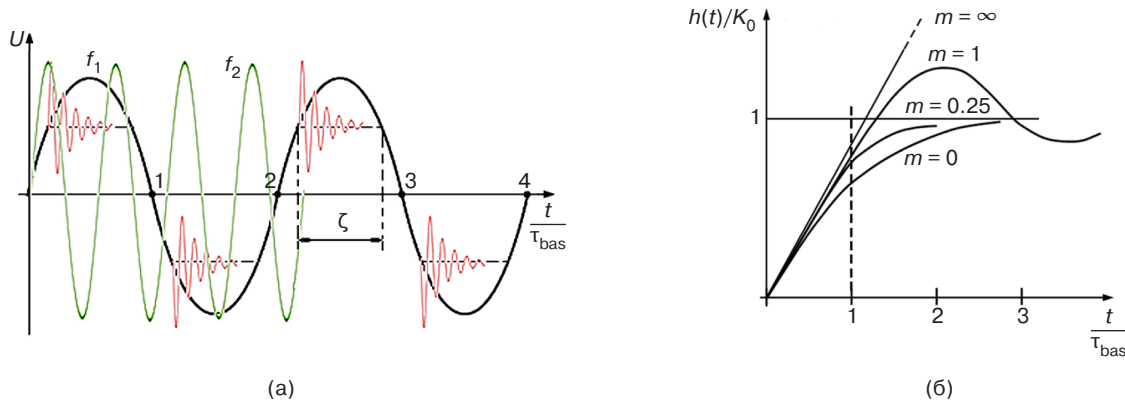


Рис. 2. Переходные искажения на выходе СШП-усилителя: (а) искажения сигнала при перегруженном режиме в области переходных частот (по осям x и y – нормированные величины), (б) передаточная функция СШП-усилителя для различных значений параметра коррекции m

$$|A\beta| \geq 1 \text{ и } \angle A\beta = 2\pi n, n \in \mathbb{Z}, \quad (1)$$

где A – коэффициент усиления, β – коэффициент передачи обратной связи, $\angle A\beta$ – фазовый сдвиг между входом и выходом через петлю обратной связи, \mathbb{Z} – множество целых чисел.

Таким образом, для существования автоколебаний усиление должно компенсировать потери в цепи обратной связи, и полный фазовый сдвиг в цепи обратной связи должен быть кратен 2π [6].

Пусть СШП-усилитель имеет комплексную передаточную функцию f , определяемую как

$$A(f) = \frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}, \quad (2)$$

где A_0 – усиление на низких частотах ($f \ll f_c$), f_c – полюса пропускания усилителя, и комплексную функцию обратной связи:

$$B(f) = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{\text{band}}}}, \quad (3)$$

где f_{band} – полоса цепи обратной связи [7].

Тогда петлевое усиление с учетом (2) и (3):

$$T(f) = A(f)B(f) = \frac{A_0}{\left(1 + j \frac{f}{f_c}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{\text{band}}}\right)}. \quad (4)$$

В нелинейных системах, где усилитель работает в режиме ограничения, усиление является функцией амплитуды входного сигнала V :

$$A(V) = \begin{cases} A_{\text{lin}}, V < V_{\text{sat}}, \\ \frac{V_{\text{sat}}}{V}, V \geq V_{\text{sat}}, \end{cases} \quad (5)$$

где A_{lin} – линейное значение коэффициента усиления, V_{sat} – напряжение насыщения усилителя [8, 9].

При $V > V_{\text{sat}}$ усиление падает как $\frac{1}{V}$, и если коэф-

фициент передачи цепи обратной связи зависит от частоты, то, принимая во внимание (1) и (3), получим:

$$|T(f, V)| = |A(f, V)| \cdot B(f) \geq 1. \quad (6)$$

Условие самовозбуждения усилителя по критерию Баркгаузена (6) может выполняться только на определенных частотах, где коэффициент передачи цепи обратной связи $B(f)$ достигает значительных величин. Это возможно при наличии частотного резонанса, обусловленного корректирующими (паразитными) индуктивностями и емкостями схемы. Физический принцип данного явления заключается в следующем: при работе СШП-усилителя в нелинейном режиме ограничения сигнала (насыщения) форма выходного напряжения существенно искажается – из синусоидального сигнала он преобразуется в сигнал, близкий к прямоугольному импульсу, содержащему резкие фронты и спады. Такие временные перепады несут в себе широкий спектр высокочастотных гармоник, что следует из теории преобразования Фурье. Если среди этих гармоник существуют гармоники, совпадающие с резонансными частотами корректирующих (паразитных) LC⁶-цепочек, то соответствующие гармоники усиливаются за счет увеличения коэффициента передачи $B(f)$. В результате система переходит в режим генерации широкополосного сигнала, который во временной области представляет собой затухающий колебательный импульс (близкий по форме к моноциклу Гаусса), а в частотной – имеет широкую полосу энергетического спектра, охватывающего диапазон до сотен мегагерц [8, 10–12].

⁶ Электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности (L) и конденсатора (C), соединенных вместе. [An electrical circuit consisting of an inductor (L) and a capacitor (C) connected together.]

Рассмотрим процесс возбуждения радиовизионной антенны синтезируемым радиоимпульсом. Известно, что функция электрической компоненты поля $E(t)$ радиовизионного сигнала на выходе СШП-антенны пропорциональна производной функции тока сигнала возбуждения:

$$E(t) \approx \frac{dI_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} h_A(t),$$

где $I_{\text{ВЫХ}}(t)$ – ток радиоимпульса возбуждения, сформированный на выходе каскадов СШП-усилителей с некоторой импульсной характеристикой $h_A(t)$ [13].

Для создания программно-численной модели синтеза спектра радиовизионного сигнала на базе каскадов из СШП-усилителей проведено экспериментальное измерение S -параметров для выборки из трех случайно выбранных СШП-усилителей типа SBB5089Z. Регистрация S -параметров линейки СШП-усилителей проводилась при помощи векторного анализатора цепей R&S ZNLE⁷ в полосе частот 0.01–5 ГГц (табл. 1).

Таблица 1. Радиотехнические характеристики СШП-усилителей

Параметр	SBB5089Z	TQP7M9103 ⁸	WYDZ ⁹
Коэффициент усиления, дБ	20–30	30	60
Полоса пропускания, МГц	50–6000	10–3000	1–2000
Уровень шума, дБ	3.5	4	6–8
Предельная выходная мощность, дБм	23	20	15
Предельная входная мощность, дБм	15	10	5

По результатам векторных измерений на рис. 3 приведены передаточные характеристики S_{21} , которые были сведены в векторные массивы для интерпретации СШП-усилителей при программно-численном моделировании формирователя радиовизионного сигнала в среде *MATLAB Simulink*¹⁰ (рис. 4).

⁷ R&S ZNLE – векторный анализатор цепей производства компании Rohde & Schwarz (Германия). Предназначен для тестирования высокочастотных компонентов, таких как фильтры, усилители, кабели и антенны. [R&S ZNLE is a vector network analyzer manufactured by Rohde & Schwarz, Germany. It is designed for testing high-frequency electronic components such as filters, amplifiers, cables, and antennas.]

⁸ TQP7M9103 – высоколинейный усилитель сигнала, выпускаемый компанией Qorvo (США). [TQP7M9103 is a high-power signal amplifier manufactured by Qorvo, USA.]

⁹ WYDZ – малошумящий усилитель сигнала, выпускаемый компанией TZT (Китай). [WYDZ is a low-noise amplifier manufactured by TZT, China.]

¹⁰ <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Дата обращения 06.02.2025. / Accessed February 06, 2026.

Схема формирователя синтезируемого спектра возбуждения СШП-антенны состоит из следующих функциональных блоков: 1 – генератор низкомодового сигнала, по выбору частоты соответствующий условию $m = 1$; 2 – блок входных параметров радиосистемы, задаваемый специальной библиотекой Simscape (устанавливает основные характеристики сигнала, передаваемого в тракт СШП-усиления); 3 – СШП-усилитель формирования переходных искажений; 4 – усилитель для дальнейшей передачи сигнала (передаточные характеристики S_{21} подгружаются из массивов, полученных в результате векторных измерений); 5 – блок выходных параметров радиосистемы; 6 – осциллограф, регистрирующий сигнал возбуждения СШП-антенны; 7 – блок свойств радиосистемы, определяющий глобальные параметры моделирования, такие как частотный диапазон, шум, импеданс и т.д.

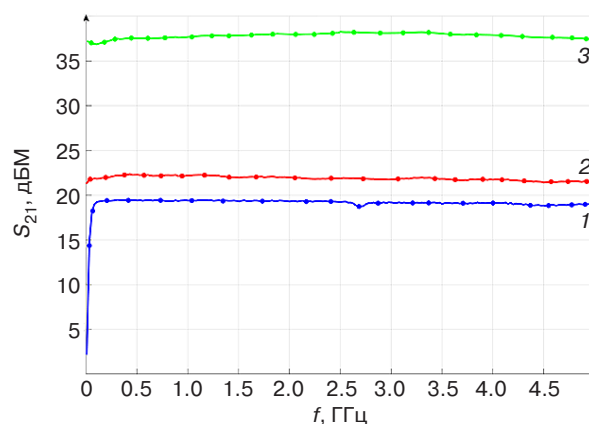


Рис. 3. Передаточные характеристики S_{21} СШП-усилителей: SBB5089Z (1), TQP7M9103 (2), WYDZ (3)

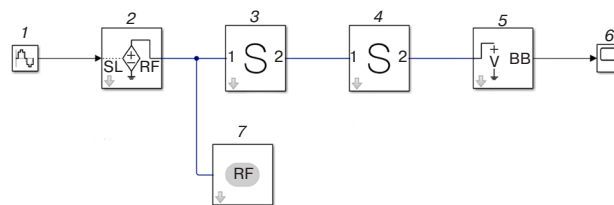


Рис. 4. Модель нелинейного формирователя синтезируемого спектра радиовизионного сигнала возбуждения СШП-антенны.

RF (radio frequency) – радиочастотный; SL (*Simulink*) – принимает сигнал от стандартного блока *Simulink*; BB (baseband) – основная полоса

Усилительный СШП-каскад с индуктивной коррекцией (рис. 1) может быть представлен эквивалентной схемой RLC¹¹-фильтра второго порядка (рис. 5). Динамика переходного процесса в такой

¹¹ Электрическая схема, состоящая из резистора (R), индуктивности (L) и емкости (C). [An electrical circuit consisting of a resistor (R), an inductor (L) and a capacitor (C).]

схеме при подаче ступенчатого воздействия (что эквивалентно резкому открытию транзистора в режиме насыщения) полностью определяется параметром коррекции m . Таким образом, задача состоит в том, чтобы подобрать такие условия работы усилителя, при которых $m = 1$.

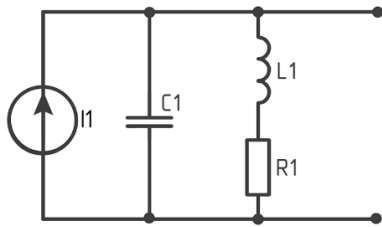


Рис. 5. Эквивалентная схема RLC-фильтра второго порядка

Параметры $R1$, $L1$ и $C1$ в эквивалентной схеме не являются постоянными величинами. Они представляют собой эффективные параметры усилителя, которые зависят от частоты входного сигнала. Следовательно, параметр коррекции m сам является функцией частоты $m(f)$. Задача сводится к нахождению такой частоты возбуждения f_{opt} , при которой выполняется условие $m(f_{opt}) = 1$.

Анализируя S_{21} -параметры (рис. 3) усилителя SBB5089Z, можно выделить диапазон от 40 до 50 МГц, где наблюдается аномалия амплитудно-частотной характеристики, свидетельствующая о сложном взаимодействии внутренних реактивных элементов. Эта область соответствует зоне, где усилитель склонен к колебательным переходным процессам. Путем моделирования в программе *Simulink* (рис. 4) было установлено, что именно при возбуждении на частоте 47 МГц и перегрузке по входу (амплитуда 400 мВ) достигается режим, соответствующий $m = 1$. Моделированный импульсный сигнал функции возбуждения, задаваемый низкомодовым колебанием, будет иметь вид, приведенный на рис. 6.

После прохождения усилительного тракта в результате перегрузки по входу первого СШП-усилителя в переходном режиме на выходе второго усилительного СШП-каскада имеем синтезируемый сигнал с расширенным спектром – нелинейная спектральная насыщенность в полосе до 900 МГц. С учетом импульсной характеристики полосковой целевой СШП-антенны типа Вивальди, используемой в работе, спектр E радиовизионного сигнала на ее выходе представлен на рис. 7.

При проведенном моделировании в среде *MATLAB Simulink* был выполнен анализ преобразования спектра сигнала. Исходный гармонический сигнал с частотой 47 МГц обладал узкополосным

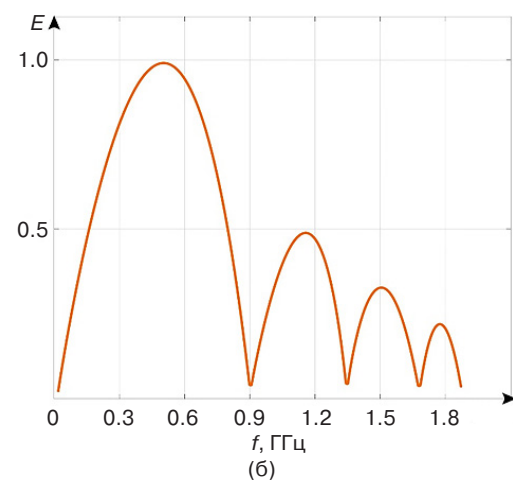
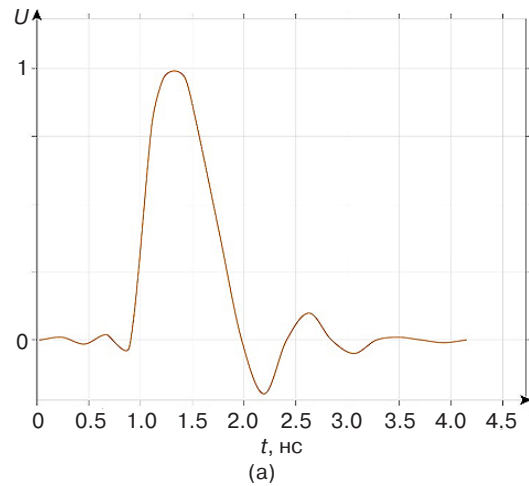


Рис. 6. Синтезируемый низкомодовым колебанием импульсный сигнал возбуждения СШП-антенны при перегруженном динамическом режиме СШП-усилителя SBB5089Z (по вертикальным осям – нормированные значения):
(а) временное представление радиоимпульса U ,
(б) спектр E синтезируемого на переходных искажениях радиоимпульса

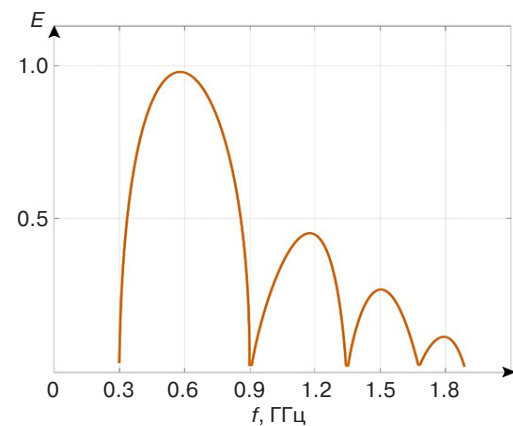


Рис. 7. Спектр радиовизионного сигнала на выходе СШП-антенны Вивальди (по оси E – нормированные значения)

спектром. Эффективная ширина спектра (рассчитанная на уровне -10 дБ от пиковой мощности) исходного сигнала составляла ~ 42.25 МГц. После прохождения предложенной усилительной системы, работающей в режиме преднамеренной перегрузки и управляемых переходных искажений, сигнал претерпел нелинейное спектральное преобразование. На выходе системы был сформирован короткий радиоимпульс с крутыми фронтами, характерный для СШП-сигналов. Анализ выходного сигнала показал, что его эффективная ширина спектра (также на уровне -10 дБ) расширилась до значения ~ 900 МГц, что соответствует коэффициенту расширения спектра более 20.

2. РАСПОЗНАВАНИЕ РАДИОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЖЕСТОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ОТКЛИКОМ НА СИНТЕЗИРОВАННЫЙ РАДИОВИЗИОННЫЙ СИГНАЛ

Экспериментальная часть исследования проведена для проверки эффективности разработанного метода нелинейного формирования спектра радиовизионного сигнала и подтверждения результатов численного моделирования. Такая постановка обусловлена тем, что эффективность систем идентификации в значительной степени определяется характеристиками зондирующего сигнала: ширина спектра и форма импульса напрямую влияют на разрешающую способность, устойчивость к помехам и достоверность выделения признаков. Эксперимент был сосредоточен на идентификации четырех различных жестов рук и оценке точности, стабильности и надежности системы распознавания.

Для проведения экспериментов на основе модели нелинейного формирователя синтезируемого спектра радиовизионного сигнала возбуждения СШП-антенны (рис. 4) создан киберфизический стенд идентификации жестов рук (рис. 8), состоящий из следующих блоков:

- векторный генератор импульсов R&S SMBV100B¹², предназначенный для формирования исходного гармонического сигнала. Используя данные, полученные в первой части статьи, сигнал генерировался на частоте 47 МГц;
- блок формирования СШП-сигнала, состоящий из двух малошумящих СШП-усилителей SBB5089Z,

¹² SMBV100B – высокопроизводительный векторный генератор сигналов компании Rohde & Schwarz (Германия). Предназначен для генерирования сложных, модулированных радиочастотных сигналов для тестирования и измерений. [SMBV100B is a high-performance vector signal generator manufactured by Rohde & Schwarz, Germany. It is designed to generate complex and modulated radio frequency (RF) signals for testing and measuring purposes.]

работающих в преднамеренно перегруженном режиме (рис. 3);

- антенная система, включающая в себя пару приемо-передающих СШП-антенн типа Вивальди Deerpase R101C¹³, которые излучают зондирующий сигнал (рис. 7) и принимают отраженный от объекта (руки) отклик;
- блок усиления принятого сигнала, состоящий из двух СШП-усилителей сигнала;
- система сбора данных, состоящая из цифрового осциллографа R&S RTO2032¹⁴, который использовался для оцифровки и регистрации принятых сигналов;
- блок обработки, которым является персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением для обработки, анализа и визуализации полученных данных.

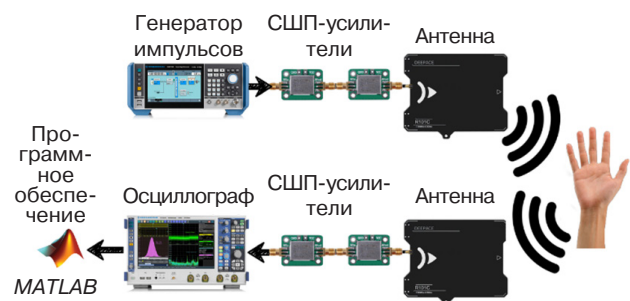


Рис. 8. Киберфизический стенд идентификации жестов рук

Для эксперимента были выбраны такие жесты, как вращение кистью (далее – вращение), отталкивание кистью от груди (далее – отталкивание), пролистывание справа налево (далее – пролистывание) и сжатие кулака (далее – сжатие) (рис. 9). Эти движения охватывают широкий спектр характеристик кинематики жеста, обеспечивая разнообразие направлений и типов движений [14–16]. Они просты, понятны человеку и широко используются в повседневной жизни при управлении цифровыми устройствами [17]. Выбор жестов также продиктован их функциональной значимостью в интерфейсах (табл. 2).

¹³ Deerpase R101C – сверхширокополосная направленная антенна, выпускаемая компанией Deerpase (Китай). Используется для приема/передачи высокочастотных сигналов в широком диапазоне. [Deerpase R101C is an ultra-wideband, directional antenna manufactured by Deerpase, China. It is used for the reception and transmission of high-frequency signals over a wide range of frequencies.]

¹⁴ R&S RTO2032 – цифровой осциллограф, предназначенный для комплексного анализа сигналов в нескольких областях. Выпускается компанией Rohde & Schwarz (Германия). [R&S RTO2032 is a digital oscilloscope designed for analyzing complex signals in a variety of fields. It is manufactured by Rohde & Schwarz, Germany.]

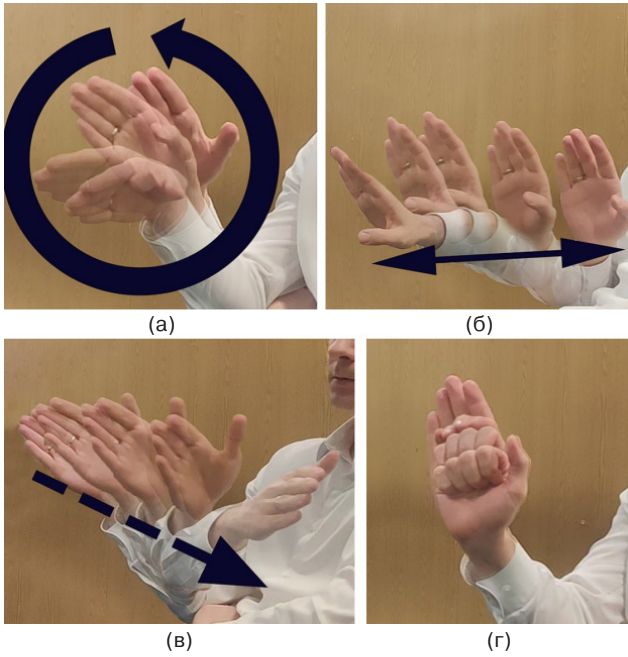


Рис. 9. Жесты, применяемые в эксперименте: (а) вращение, (б) отталкивание, (в) пролистывание, (г) сжатие

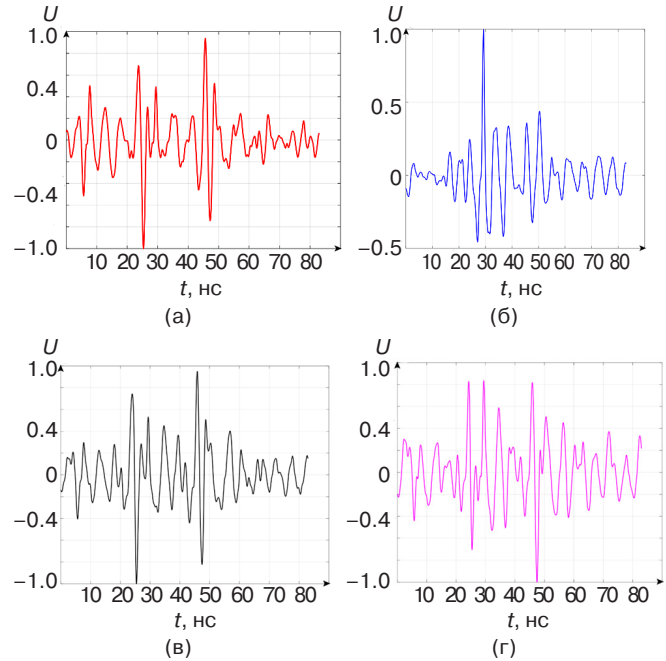


Рис. 10. Представление реперных радио изображений жестов (по вертикальным осям – нормированные значения): (а) вращение, (б) отталкивание, (в) сжатие, (г) пролистывание

Таблица 2. Характеристики жестов

Жест	Характеристика	Тип движения	Амплитуда, см	Время жеста, с	Кинематика	Функция в интерфейсе
Вращение кистью	Непрерывное периодическое	Непрерывное периодическое	<15	0.4	Изменение угла кисти относительно направления сигнала	Управление настройками, прокрутка параметров
Отталкивание	Поступательное	Поступательное	>30	0.8	Движение от центра тела	Отмена/отклонение
Пролистывание	Горизонтальное	Горизонтальное	15–30	0.6	Строго выраженное направление	Навигация по интерфейсу
Сжатие кулака	Статическое	Статическое	<5	0.3	Изменение формы кисти без значительного перемещения	Подтверждение или активация команд

Каждый жест представлялся в виде набора из 10 контрольных кадров (радиовизуальных «снимков»), которые сворачивались в единое итоговое радиоизображение, или реперный радиопортрет, который служил уникальным эталоном для данного жеста (рис. 10). В ходе эксперимента были определены коэффициенты корреляции Пирсона для анализа линейной взаимосвязи между выбранными жестами. Результаты эксперимента показали, что система идентификации обладает высокой точностью в распознавании каждого жеста при их повторении, о чем свидетельствуют значения внутригрупповой корреляции, близкие к 1. Например, вращение кистью имеет коэффициент 0.95, отталкивание – 0.99, сжатие кулака – 0.96, а пролистывание кистью – 0.97 (табл. 3). Это подтверждает стабильность распознавания одного и того же движения.

Таблица 3. Усредненный коэффициент корреляции между реперными радиопортретами и выполненными жестами

Жест	Реперный радио-портрет	Вращение	Отталкивание	Сжатие	Пролистывание
Вращение		0.95	0.30	0.82	0.62
Отталкивание		0.30	0.99	0.48	0.65
Сжатие		0.82	0.48	0.96	0.84
Пролистывание		0.62	0.65	0.84	0.97

Необходимо отметить, что некоторые пары жестов показали высокую корреляцию, например, сжатие кулака и пролистывание – 0.84, что говорит о схожести признаков, используемых системой для их распознавания. В то же время вращение и пролистывание имеют среднюю корреляцию 0.62, что может быть связано с общими компонентами движения кисти. Умеренная связь была отмечена между отталкиванием и пролистыванием – 0.65, что объясняется направленным характером обоих движений.

Низкая корреляция наблюдалась между вращением и отталкиванием – 0.30, а также между отталкиванием и сжатием – 0.48. Эти жесты имеют существенно разные кинематические характеристики, что указывает на их хорошую различимость системой.

На основе результатов можно сделать вывод, что система эффективно распознает выбранные жесты, обеспечивая их высокую точность и стабильность. Это обусловлено высокой воспроизводимостью формы СШП-импульса, полученного при возбуждении усилителя SBB5089Z.

В ходе эксперимента была изучена реакция системы распознавания жестов на некорректные или пропущенные контрольные кадры жеста. Для оценки устойчивости системы к ошибкам последовательно увеличивалось количество искаженных или пропущенных кадров – от одного до девяти. Результаты показали, что разные жесты обладают различной степенью устойчивости к некорректным (пропущенным) кадрам (рис. 11). Например, жест отталкивания проявил наибольшую стабильность, а жест пролистывания – наименьшую. Это говорит о том, что успешное распознавание жеста требует наличия различного количества контрольных кадров.

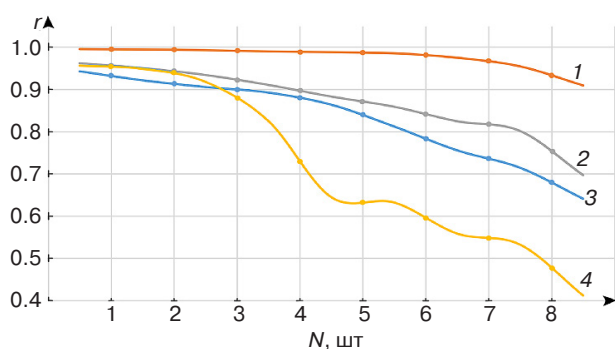


Рис. 11. Влияние количества N неверных кадров жеста на коэффициент корреляции r с реперным радиоизображением: 1 – отталкивание, 2 – сжатие, 3 – вращение, 4 – пролистывание

Эксперимент показал, что система распознавания идентифицирует жесты с коэффициентом корреляции выше 0.95, но ее устойчивость к некорректным (пропущенным) кадрам зависит

от особенностей жеста. Так, отталкивание и сжатие оказались более надежными относительно других жестов, демонстрируя коэффициент корреляции более 0.90 даже при 4 пропущенных кадрах. Эти жесты можно считать подходящими для применения в сложных условиях, где возможен прием неполных или искаженных данных, например, при помехах или снижении качества записи. В то же время пролистывание кистью требует более строгого контроля качества, т.к. этот жест зависит от корректности всего набора снимков.

Полученные результаты подчеркивают необходимость анализа специфики каждого жеста при разработке систем распознавания. Для жестов с высокой чувствительностью к искажениям, таких как пролистывание, может потребоваться дополнительная оптимизация алгоритмов обработки данных или включение механизмов компенсации ошибок. Это позволит повысить надежность системы в реальных условиях эксплуатации, где потеря данных или их частичное искажение неизбежны.

Также был проведен эксперимент по оценке повторяемости идентификации жестов. Каждый жест повторялся 100 раз, и анализировались результаты проведенной идентификации (табл. 4).

Таблица 4. Оценка повторяемости эксперимента

Жест	Количество выполненных жестов	Количество правильно распознанных жестов	Повторяемость
Вращение кистью	100	95	0.95
Отталкивание		98	0.98
Пролистывание		96	0.96
Сжатие		94	0.94

В результате оценки повторяемости определено, что достоверность распознавания всегда была выше 0.94. При такой ее величине эксперимент можно считать надежным и достоверным. Влияние случайных факторов минимально, а результаты можно уверенно применять на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены и проанализированы S -параметры трех радиочастотных СШП-усилителей. В результате у СШП-усилителя SBB5089Z выявлена возможность управляемого искажения сигнала в диапазоне от 40 до 50 МГц для расширения

- выходного спектра. Определено, что на частоте 47 МГц параметр коррекции равен 1.
- Предложен метод нелинейного синтеза спектра радиовизионного сигнала, который позволил обеспечить значение коэффициента расширения спектра более 20.
 - Система идентификации жестов на основе предложенного метода показала высокую эффективность: коэффициент корреляции между распознаваемым и реперным жестом составляет 0.99 для жеста отталкивания, 0.95 – для жеста вращения, 0.96 – для жеста пролистывания и 0.96 – для жеста сжатия.
 - Особое внимание уделено устойчивости системы к воздействию на процесс идентификации жестов, выраженному в появлении ошибочных или пропущенных кадров. В рамках каждого жеста изучалось, как система реагирует на частичную потерю данных. Результаты показали, что

- все жесты возможно распознать с коэффициентом корреляции выше 0.9.
- Повторяемость идентификации жестов составляет не менее 0.94.

Вклад авторов

К.В. Латышев – построение программно-численной модели и лабораторного стенда системы киберфизического мониторинга для радиосенсорной идентификации жестикуляции человека.

М.С. Костин, К.А. Бойков – разработка нелинейного синтезируемого спектра радиовизионного сигнала в условиях перегруженного режима сверхширокополосного усиления.

Authors' contributions

K.V. Latyshev – developing the software-numerical model and laboratory stand of a cyber-physical monitoring system for radio-frequency identification of human gestures.

M.S. Kostin, K.A. Boikov – developing the nonlinear synthesized spectrum of a radiovision signal under overloaded ultra-wideband amplification mode.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Khan I., Kwon Y. Radar-based Hand Gesture Recognition with Feature Fusion using Robust CNN-LSTM and Attention Architecture. *IEEE Access*. 2025;13:69281–69291. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558293>
- Костин М.С., Бойков К.А. Цифровые технологии сигнального радиовидения и радиомониторинга. *Russian Technological Journal*. 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>
- Wu M. Gesture Recognition Based on Deep Learning: A Review. *EAI Endorsed Transactions on e-Learning*. 2024;10. <https://doi.org/10.4108/eetel.5191>
- Qu C., Zhang Y., Jin L., et al. Exploring hand gesture recognition using micro-Doppler radar data based on vision transformers. *J. Phys.: Conf Ser.* 2023;2504:012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2504/1/012046>
- Sedra A., Smith K., Carusone T., Gaudet V. *Microelectronic Circuits (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)*. 8th ed. Oxford University Press; 2020. P. 58–134, 174–246, 508–696.
- He F., Ribas R., Lahuec C., Jézéquel M. Discussion on the general oscillation startup condition and the Barkhausen criterion. *Analog Integr. Circ. Signal Process.* 2009;59:215–221. <https://doi.org/10.1007/S10470-008-9250-1>
- Razavi B. *RF Microelectronics (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series)*. 2nd ed. Prentice Hall Press; 2011. P. 255–333, 751–831.
- Wang Y., Lang L., Lee C.H., Zhang B., Chong Y. Topologically enhanced harmonic generation in a nonlinear transmission line metamaterial. *Nat. Commun.* 2019;10:Article number:1102. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08966-9>
- Guarcello C., Ahrens F., Avallone G., et al. Nonlinear Behavior of Josephson Traveling Wave Parametric Amplifiers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2024;34(3):1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3367615>
- Hong M., Chang Y.H., Dienes A., Delfyett P., Dijaili S., Patterson F. Femtosecond self- and cross-phase modulation in semiconductor laser amplifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 1996;2(3):523–539. <https://doi.org/10.1109/2944.571753>
- Hussain S., Siddiqui H., Saleem A., et al. Therapeutic Exercise Recognition Using a Single UWB Radar with AI-Driven Feature Fusion and ML Techniques in a Real Environment. *Sensors*. 2024;24(17):5533. <https://doi.org/10.3390/s24175533>
- Oppermann I., Hämmäläinen M., Inatti J. *UWB Theory and Applications*. John Wiley & Sons; 2004, 248 p.
- Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. CRC Press; 2016, 494 p.
- Бульгин Д.А., Мамонова Т.Е. Распознавание жестов рук в режиме реального времени. *Системы анализа и обработки данных*. 2020;78(1):25–40. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-25-40>
- Шадинов С.С. Пространственная сверхширокополосная визуализация зондируемых объектов ближнего радионаблюдения. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.8>. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul20/8/text.pdf>. Дата обращения 05.02.2026.
- Wang X., Dinh A., Teng D. Radar Sensing Using Ultra Wideband – Design and Implementation. In: Matin M.A. (Ed.). *Ultra Wideband – Current Status and Future Trends*. 2013;11:41–63. <https://doi.org/10.5772/48587>
- Латышев К.В. Киберфизическое радиожестикуляционное FPV-управление дронами. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком – 2024»): Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2024. С. 441–445. <https://www.elibrary.ru/dukcnp>

REFERENCES

1. Khan I., Kwon Y. Radar-based Hand Gesture Recognition with Feature Fusion using Robust CNN-LSTM and Attention Architecture. *IEEE Access*. 2025;13:69281–69291. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3558293>
2. Kostin M.S., Boikov K.A. Digital technologies for signal radio vision and radio monitoring. *Russian Technological Journal*. 2024;12(4):59–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-59-69>
3. Wu M. Gesture Recognition Based on Deep Learning: A Review. *EAI Endorsed Transactions on e-Learning*. 2024;10. <https://doi.org/10.4108/eetel.5191>
4. Qu C., Zhang Y., Jin L., et al. Exploring hand gesture recognition using micro-Doppler radar data based on vision transformers. *J. Phys.: Conf Ser.* 2023;2504:012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2504/1/012046>
5. Sedra A., Smith K., Carusone T., Gaudet V. *Microelectronic Circuits (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)*. 8th ed. Oxford University Press; 2020. P. 58–134, 174–246, 508–696.
6. He F., Ribas R., Lahuec C., Jézéquel M. Discussion on the general oscillation startup condition and the Barkhausen criterion. *Analog Integr. Circ. Signal Process.* 2009;59:215–221. <https://doi.org/10.1007/S10470-008-9250-1>
7. Razavi B. *RF Microelectronics (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series)*. 2nd ed. Prentice Hall Press; 2011. P. 255–333, 751–831.
8. Wang Y., Lang L., Lee C.H., Zhang B., Chong Y. Topologically enhanced harmonic generation in a nonlinear transmission line metamaterial. *Nat. Commun.* 2019;10:Article number:1102. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08966-9>
9. Guarcello C., Ahrens F., Avallone G., et al. Nonlinear Behavior of Josephson Traveling Wave Parametric Amplifiers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2024;34(3):1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3367615>
10. Hong M., Chang Y.H., Dienes A., Delfyett P., Dijaili S., Patterson F. Femtosecond self- and cross-phase modulation in semiconductor laser amplifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 1996;2(3):523–539. <https://doi.org/10.1109/2944.571753>
11. Hussain S., Siddiqui H., Saleem A., et al. Therapeutic Exercise Recognition Using a Single UWB Radar with AI-Driven Feature Fusion and ML Techniques in a Real Environment. *Sensors*. 2024;24(17):5533. <https://doi.org/10.3390/s24175533>
12. Oppermann I., Hämäläinen M., Iinatti J. *UWB Theory and Applications*. John Wiley & Sons; 2004, 248 p.
13. Taylor J.D. (Ed.). *Advanced Ultrawideband Radar. Signals, Targets, and Applications*. CRC Press; 2016, 494 p.
14. Bulygin D.A., Mamonova T.E. Recognition of hand gestures in real time. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*. 2020;78(1):25–40 (in Russ.). <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-25-40>
15. Shadinov S.S. Spatial ultra-wideband visualization of probed near-field surveillance objects. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2020;7 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.8>. Available from URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul20/8/text.pdf>. Accessed May 02, 2026.
16. Wang X., Dinh A., Teng D. Radar Sensing Using Ultra Wideband – Design and Implementation. In: Matin M.A. (Ed.). *Ultra Wideband – Current Status and Future Trends*. 2013;11:41–63. <https://doi.org/10.5772/48587>
17. Latyshev K.V. Cyberphysical radio-gestural FPV control drones. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Information Communication systems (Radioinfocom – 2024): Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2024. P. 441–445 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/dukcnp>

Об авторах

Латышев Кирилл Валерьевич, старший преподаватель, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: latyshev@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 7415-5362, <https://orcid.org/0009-0007-4393-6887>

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Бойков Константин Анатольевич, д.т.н., профессор, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: boykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, SPIN-код РИНЦ 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

About the Authors

Kirill V. Latyshev, Senior Lecturer, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: latyshev@mirea.ru. RSCI SPIN-code 7415-5362, <https://orcid.org/0009-0007-4393-6887>

Mihail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Deputy Director, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Konstantin A. Boikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: boykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, RSCI SPIN-code 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 67.02

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-69-79>

EDN HEGGBA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Поиск технологических решений, направленных на снижение количества дефектов изображения в гибридном приборе ближнего инфракрасного диапазона

А.А. Егоренков[®], И.В. Данилова, М.И. Бибинова,
С.Н. Челышков, А.Н. Вязников, К.С. Баталов

АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, 194223 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: a.egorenkov@niielectron.ru

• Поступила: 11.08.2025 • Доработана: 24.10.2025 • Принята к опубликованию: 04.02.2026

Резюме

Цели. Основная цель работы – уменьшение дефектов изображения, получаемого в гибридном фотоприемнике с диапазоном чувствительности 0.95–1.65 мкм на основе фотокатода из фосфида индия/арсенида галлия-индия (InP/InGaAs). Для этого необходимо улучшить качество поверхности фотокатода перед взрывной фотолитографией, а также обеспечить высокую воспроизводимость фотолитографического процесса.

Методы. Для достижения поставленной цели проведена серия экспериментов по очистке поверхности и по усовершенствованию технологического процесса взрывной фотолитографии. Для подготовки поверхности опробованы следующие методы: химическое травление поверхности InGaAs, покрытие поверхности фотокатода защитным слоем фоторезиста перед резкой пластины, использование различных способов удаления фоторезиста (в диметилформамиде и плазме), внедрение механической очистки поверхности. Для усовершенствования фотолитографии проведены эксперименты со временем и способами сушки фоторезиста, проведено варьирование режимов экспонирования и проявления, заменен фоторезист.

Результаты. Изготовленные по усовершенствованной технологии образцы демонстрируют более чем девятикратное снижение среднего процента дефектов от общей площади поверхности фотокатода по сравнению со старыми образцами: с 0.317% до 0.035%. Благодаря улучшению качества поверхности фотокатода изображение в готовом приборе стало более однородным, количество дефектов изображения значительно уменьшилось. Обеспечена высокая воспроизводимость процесса.

Выводы. Усовершенствованная технология подготовки поверхности, а также уменьшение толщины фоторезиста, используемого во взрывной фотолитографии, привело к увеличению однородности изображения в гибридном приборе, а также к уменьшению дефектов. Предлагаемый подход может быть применен при серийном производстве гибридных высокочувствительных фотоприемников ближнего инфракрасного (ИК) диапазона и позволяет им быть конкурентоспособными с мировыми аналогами.

Ключевые слова: фотоприемники ближнего ИК-диапазона, InP/InGaAs-фотокатод, очистка поверхности InGaAs, взрывная фотолитография

Для цитирования: Егоренков А.А., Данилова И.В., Бибинова М.И., Челышков С.Н., Вязников А.Н., Баталов К.С. Поиск технологических решений, направленных на снижение количества дефектов изображения в гибридном приборе ближнего инфракрасного диапазона. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):69–79. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-69-79>, <https://www.elibrary.ru/HEGGBA>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Search of technological solutions aimed at reducing the number of image defects in a hybrid SWIR device

Artyom A. Egorenkov[®], Irina V. Danilova, Maria I. Bibinova, Sergei N. Chelyshkov, Alexei N. Vyaznikov, Konstantin S. Batalov

NRI Electron, Saint Petersburg, 194223 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: a.egorenkov@nrielectron.ru

• Submitted: 11.08.2025 • Revised: 24.10.2025 • Accepted: 04.02.2026

Abstract

Objectives. The primary aim of this study is to minimize image defects in a hybrid photodetector with a sensitivity range of 0.95–1.65 μm , based on an InP/InGaAs photocathode. In order to achieve this, the surface quality of the photocathode must be improved prior to lift-off photolithography. In addition, the photolithographic process must be made highly reproducible.

Methods. In order to achieve this goal, a series of experiments on surface cleaning and improvement of the lift-off photolithography process were conducted. The following surface preparation methods were tested: chemical etching of the InGaAs surface; coating the photocathode surface with a protective photoresist layer before cutting the plate; using various photoresist removal methods (in dimethylformamide and plasma); and mechanical surface cleaning. In order to improve photolithography, experiments were conducted on drying times and photoresist methods, exposure and development modes were varied, and photoresist was replaced.

Results. Samples manufactured using the improved technology demonstrate a more than ninefold reduction in the average percentage of defects on the photocathode surface from 0.317% to 0.035%. Thanks to the improved quality of the photocathode surface, the image in the finished device is more uniform and the number of image defects significantly decreased. The process is highly reproducible.

Conclusions. Improvements in surface preparation technology, coupled with a reduction in the thickness of the photoresist used in lift-off photolithography lead to greater uniformity of images in hybrid devices and fewer defects. The proposed approach can be used for the mass production of high-sensitivity near-infrared hybrid photodetectors, making them competitive with those produced elsewhere.

Keywords: SWIR photodetectors, InP/InGaAs photocathode, surface cleaning of InGaAs, lift-off photolithography

For citation: Egorenkov A.A., Danilova I.V., Bibinova M.I., Chelyshkov S.N., Vyaznikov A.N., Batalov K.S. Search of technological solutions aimed at reducing the number of image defects in a hybrid SWIR device. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):69–79. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-69-79>, <https://www.elibrary.ru/HEGGBA>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из популярных диапазонов съемки является коротковолновый инфракрасный (ИК) диапазон, излучение в котором имеет свойства, схожие с видимым диапазоном излучения. Однако коротковолновый ИК-диапазон является перспективным во множестве применений благодаря его уникальным особенностям:

- прозрачность некоторых материалов¹;
- использование в качестве подсветки невидимого излучения (излучение ночного неба, лазерное излучение с длиной волны 1.55 мкм, являющееся безопасным для зрения) [1];
- возможность различать объекты, имеющие одинаковый цвет в видимом диапазоне [2];
- по сравнению с видимым диапазоном возможность наблюдения на более дальних расстояниях и при плохой видимости (смог, дождь, туман) [3].

Камеры, работающие в ближнем ИК-диапазоне, имеют широкий спектр применений как в научных исследованиях, так и в гражданской и военно-оборонной промышленности. Например, в электронной промышленности они используются для проверки печатных плат и солнечных панелей на наличие дефектов²; в пищевой промышленности – для проверки качества продуктов [4]; в военно-оборонной промышленности – при разведывательно-тактических операциях для обнаружения замаскированных объектов и слежения [5]; в медицине – для анализа тканей неинвазивными способами и визуализации подкожных тканей [6].

Перспективными фоточувствительными устройствами, работающими в коротковолновом ИК-диапазоне, являются гибридные фотоприемники, которые состоят из фотокатода и твердотельного чувствительного к электронам элемента (анода) в едином вакуумном объеме (рис. 1). Фотокатод, работающий в режиме «на пропускание», поглощает кванты излучения, за счет чего внутри его объема генерируются электронно-дырочные пары. Далее электроны, двигаясь к эмиттирующей поверхности, выходят в вакуум и ускоряются полем. Таким образом, анод (чувствительная к электронам матрица прибора с переносом заряда (ППЗ)) регистрирует поток электронов, интенсивность которого прямо пропорциональна интенсивности излучения, поглощенного фотокатодом.

¹ Edmund Optics. What is SWIR? https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/what-is-swir/?srsltid=AfmBOopNG8OgK_q1N35-W5tpY9aS7jqGYNeYN3mLq96-xOienoMu9u2T. Дата обращения 04.06.2025. / Accessed June 04, 2025.

² HWYL En-Vision Technology. SWIR Cameras: What Are They? [Imaging & Application Guide]. <https://hwyl.in/swir-cameras/>. Дата обращения 10.06.2025. / Accessed June 10, 2025.

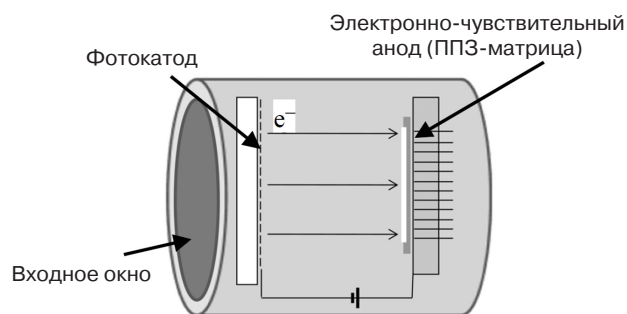


Рис. 1. Схема гибридного прибора [7]

Такой тип приборов работает на основе внешнего фотоэффекта, в связи с чем появляется необходимость нахождения такой системы в условиях вакуума. Однако преимуществом, по сравнению с твердотельными аналогами, является усиление сигнала за счет генерации ускоренными электронами большого количества электронно-дырочных пар в объеме анода. Также стоит отметить вариативность гибридной технологии, а именно, многообразие возможных фотокатодов [8–10] и анодов внутри единой конструкции.

В данной работе в качестве фотокатода выступает гетероструктура на основе фосфида индия/арсенида галлия-индия (InP/InGaAs), рабочий диапазон длин волн составляет 0.95–1.65 мкм. Для переноса фотозаряда из активного слоя фотокатода в эмиттерный слой с большей шириной запрещенной зоны на его поверхность наносится металлический слой (электрод) для формирования барьера Шоттки. При приложении внешнего напряжения барьер между активным и эмиттерными слоями снижается, и фотоэлектроны получают возможность перейти в эмиттер и затем – в вакуум [11, 12]. Для снижения работы выхода электронов с поверхности фотокатода в вакуумный промежуток применяется активация поверхности слоем цезия и кислорода Cs/O [13, 14].

Для создания металлического электрода применяется контактная обратная (взрывная) фотолитография. Однако в процессе работы выявились проблемы, связанные с загрязнением поверхности фотокатода частицами перед фотолитографией. Крупные и мелкие частицы препятствуют созданию равномерного электрода в процессе фотолитографии, что приводит к дефектам изображения в готовом приборе. Также частицы видны на итоговом изображении, формируемом камерой (рис. 2).

В области, выделенной красным прямоугольником (рис. 2), можно наблюдать дефекты, характерные для неравномерности электрода. Черные прямоугольные области – это остатки металла, которые не были удалены во время взрывной фотолитографии. В области, ограниченной синим прямоугольником, видны темные линии. Предполагается, что это

следы от кисти, которой убирались остатки металла после фотолитографии. В [15] наличие темных точек и линий на изображениях электронно-оптических преобразователей видимого и ИК-диапазонов связывают с поверхностными загрязнениями фотокатода.

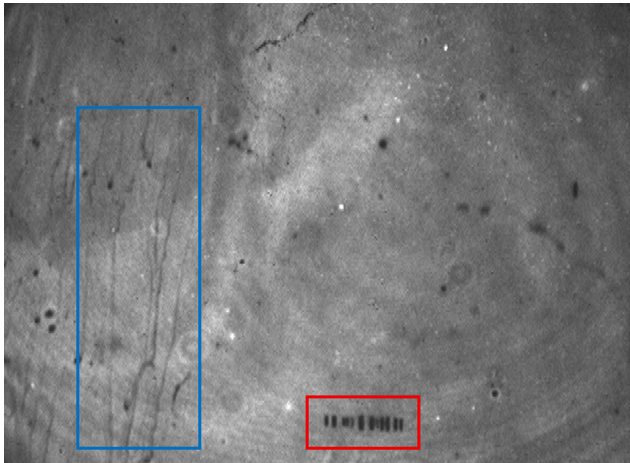


Рис. 2. Дефекты изображения, вызванные загрязнением поверхности и неоднородностью электрода

В технологии производства гибридного фотоприемника ближнего ИК-диапазона в АО «ЦНИИ «Электрон»³ используются пластины с гетероструктурой InP/InGaAs. Из одной пластины можно сделать фоточувствительные области для четырех приборов. Из-за хрупкости пластины ее резку необходимо проводить до процесса фотолитографии. Во время резки на поверхности адсорбируются различные мелкие и крупные частицы, которые впоследствии необходимо удалить, потому что они препятствуют созданию контакта при экспонировании, следовательно, увеличивают процент дефектов изображения. Также для наилучшей работоспособности фотокатодов с отрицательным электронным средством необходима атомарно-чистая поверхность [16], которая позволит обеспечить равномерность нанесения слоя Cs/O для активации поверхности [17], а также увеличит срок службы фотокатода [18].

Поиск подходящего метода очистки, эффективно для удаления загрязнений с поверхности образцов, имеет важное значение для создания качественных фотокатодов. Существует несколько методов очистки: химическая, плазменная и ионная. Среди них химическая очистка является наиболее привлекательным методом из-за дешевизны и простоты реализации процесса. Для травления полупроводников группы III–V широко применяются растворы кислот. Среди кислотных травителей комбинация соляной кислоты HCl и перекиси

водорода H₂O₂ (HCl/H₂O₂) считается одной из наиболее подходящих, поскольку она обеспечивает наименьшую степень анизотропии при травлении [19, 20]. Увеличение концентрации H₂O₂ в растворах травителя приводит к значительному увеличению скорости травления [21], что является нежелательным для наших применений, т.к. может изменить толщину внешнего эпитаксиального слоя гетероструктуры. Поэтому необходимо использовать низкие концентрации H₂O₂ для обеспечения невысоких скоростей травления. В [20] для более эффективной очистки наночастиц с поверхности InGaAs было предложено использовать раствор HCl + H₂O₂ + ADS (лаурил сульфат аммония). Добавление ADS понижает дзета-потенциал поверхности, что приводит к уменьшению адсорбции частиц.

Помимо загрязнения поверхности, возникали проблемы с невоспроизводимостью фотолитографического процесса от эксперимента к эксперименту (не всегда удавалось полностью удалить избыточный слой металла для формирования нужного рисунка). Возможной причиной неперотекания взрыва может являться использование позитивного фоторезиста, который создает положительный наклон стенок (рис. 3а). При напылении металлический слой осаждается на стенках фоторезиста, препятствуя проникновению растворителя для удаления фоторезиста и металлической пленки вместе с ним. Это делает процесс взрывной фотолитографии затруднительным или невыполнимым. В общем случае для обратной фотолитографии применяют негативные фоторезисты, которые создают отрицательный наклон стенок (рис. 3б), способствующий удалению излишней металлизации⁴.

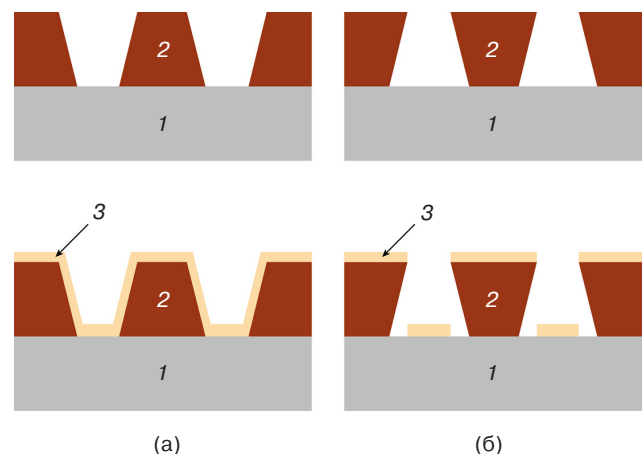


Рис. 3. Схематичное изображение стенок фоторезиста: (а) положительный наклон, (б) отрицательный наклон, где 1 – подложка, 2 – фоторезист, 3 – металл

⁴ Обращенная, взрывная литография фоторезист ФПН-20-ИЗО. <https://www.frast.ru/obrashchennaya-vzryvnaya>. Дата обращения 25.09.2025. [Image reversal (lift-off) photoresist FPN-20-ISO. <https://www.frast.ru/obrashchennaya-vzryvnaya>. Accessed September 25, 2025. (In Russ.)]

³ <https://www.niielectron.ru/>. Дата обращения 25.09.2025. / Accessed September 25, 2025. (In Russ.)

Для применения негативных фоторезистов необходимо изменить фотошаблон и заменить используемые растворители, что требует дополнительной технологической обработки. Разработка таких технологических изменений является предметом будущих исследований.

В настоящей статье представлены результаты экспериментов по очистке поверхности после резки, выбрана оптимальная последовательность действий для получения наиболее чистой поверхности фотокатода. Также представлены результаты экспериментов по улучшению воспроизводимости процесса взрывной фотолитографии. В результате был выбран новый фоторезист, с использованием которого взрыв происходит на каждом образце.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ранее подготовка поверхности фотокатода и последующая обратная фотолитография проводились следующим образом:

- резка вручную двухдюймовой пластины фотокатода InP/InGaAs на образцы размером 20×22 мм;
- мойка пластин в деионизованной воде в ультразвуковой установке УЗУ-0.25 (производитель – Ульяновское приборостроительное производственное объединение, СССР) в течение 5 мин;
- во время процесса фотолитографии использовался положительный фоторезист ФП-9120-1.0 (производитель – АО «НИОПИК», Россия) с толщиной 1.1–1.3 мкм;
- фотолитографические операции (экспонирование и проявление) и напыление металлического слоя с последующим взрывом проводились в разные дни.

1.1. Подготовка поверхности перед фотолитографией

Эксперименты по очистке поверхности проводились на InP/InGaAs-фотокатодах, а также на кремниевых пластинах диаметром 3 дюйма.

Для снижения загрязнений на поверхности фотокатода в технологическом процессе подготовки поверхности был проведен ряд экспериментов:

1. Травление поверхности InGaAs раствором $H_2O_2 + HCl + ADS$ составом 0.001 М перекиси водорода, 0.05 М соляной кислоты и 0.05 мМ ADS.
2. Автоматизированная резка пластин на образцы размером 20×22 мм.
3. Покрытие пластины фоторезистом перед резкой.
4. Снятие фоторезиста в диметилформамиде с последующей обработкой в плазме для удаления остатков фоторезиста.

5. Процесс очистки поверхности: механическая мойка пластины в деионизованной воде, затем мойка в ультразвуковой ванне в течение 5 мин, механическая отмывка в деионизованной воде.

1.2. Процесс фотолитографии

С целью улучшения протекания взрывной фотолитографии проведены следующие эксперименты:

1. Изменение режимов сушки фоторезиста: Инфракрасная сушка, сушка на горячей плите при температуре $T = 105$ °С в течение 1 мин, сушка в термостате при $T = 115$ °С при разном времени выдержки: 3, 5, 10 и 20 с. Также для некоторых фотокатодов был опробован способ создания «отрицательного наклона» профиля стенок фоторезиста путем дополнительного подсушивания пластины после засветки: в течение 1 мин на горячей плите для одного и в течение 5 мин в термостате для другого.
2. Изменение режимов экспонирования (разная экспозиция, разная мощность лампы) и, соответственно, проявления (разная концентрация проявителя и время проявления).
3. Уменьшение времени пролеживания образца между процессами экспонирования, проявления, напыления металла и взрыва.
4. Использование другого позитивного фоторезиста с меньшей толщиной пленки: ФП-9120-0.4 (производитель – АО «НИОПИК», Россия) с толщиной 0.4 мкм вместо ФП-9120-1.0 с толщиной 1 мкм.

1.3. Визуализация экспериментов

Снимки образцов получены с помощью оптических микроскопов МБС-1 (производитель – Лыткаринский завод оптического стекла, СССР) и NORGAU NVM-2010 (производитель – NORGAU, Россия).

Для получения изображения готового прибора при равномерной засветке использовался измерительный стенд, структурная схема которого приведена на рис. 4.

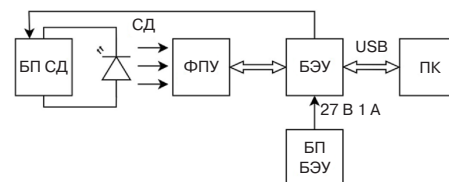


Рис. 4. Структурная схема измерительного стенда для получения изображения готового прибора: БП – блоки питания; СД – светодиод с центральной длиной волны излучения 1.55 мкм; ФПУ – фотоприемное устройство на базе гибридного прибора; БЭУ – блок электронного управления; USB (universal serial bus) – универсальная последовательная шина; ПК – персональный компьютер для управления и вывода изображения

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате травления поверхности образца InP/InGaAs, нарезанного вручную, в растворе $H_2O_2 + HCl + ADS$ в ультразвуковой установке в течение 5 мин успешной очистки поверхности фотокатода от мелких и крупных частиц произведено не было. Как видно на рис. 5, были удалены лишь некоторые крупные частицы. Возможно, некоторые из них поменяли свое положение на поверхности.

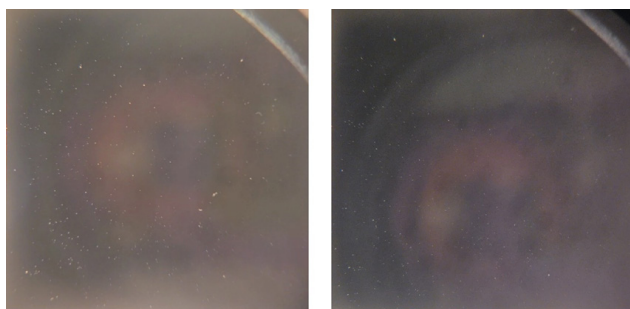


Рис. 5. Поверхность фотокатода InP/InGaAs: (а) до травления в растворе $H_2O_2 + HCl + ADS$, (б) после травления. Площадь поля зрения $20 \times 22 \text{ мм}^2$

Положительный результат был получен при замене ручной резки на автоматизированную. Автоматизированная резка привела к значительному уменьшению количества крупных частиц, адсорбированных на поверхности образца (рис. 6).

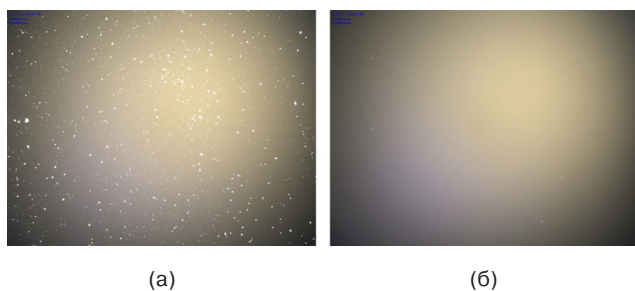


Рис. 6. Поверхность Si после: (а) ручной резки, (б) автоматизированной резки. Снимок при увеличении 0.7, площадь поля зрения $6.311 \times 6.312 \text{ мкм}^2$

Однако на поверхности все еще сохраняется большое количество мелких частиц размером примерно $10 \pm 5 \text{ мкм}$ (рис. 7а), количество которых можно уменьшить при покрытии поверхности образца фоторезистом перед процессом резки (рис. 7б). Количество мелких частиц, адсорбирующихся на поверхности во время резки, уменьшается. Однако на поверхности образца после покрытия

фоторезистом и после снятия фоторезиста в диметилформамиде появляются загрязнения из мелких частиц, которые образуют овалообразные узоры, состоящие из частиц размером $10 \pm 3 \text{ мкм}$. Данные частицы не удаляются при отмывке поверхности. Возможно, данные частицы являются не до конца удаленным диметилформамидом.

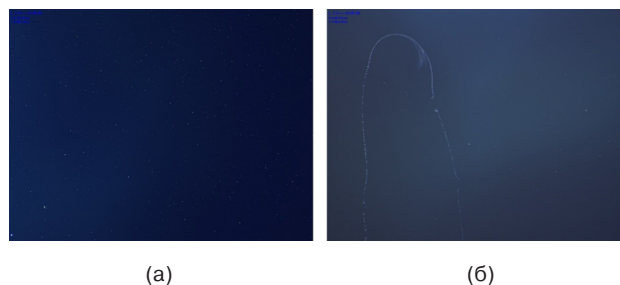


Рис. 7. Поверхность Si после автоматизированной резки образца: (а) без фоторезиста, (б) в фоторезисте. Снимок при увеличении 2.0, площадь поля зрения $2.21 \times 2.21 \text{ мкм}^2$

При использовании кислородной плазмы для удаления фоторезиста [22] на поверхности отсутствуют данные узоры, но в результате поверхность является недостаточно чистой (рис. 8).

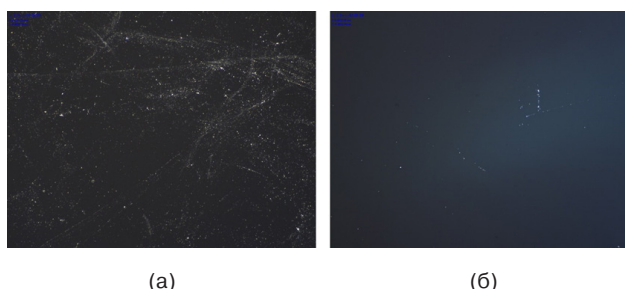


Рис. 8. Поверхность Si после плазмохимического травления: (а) неотмытая, (б) после отмывки. Снимок при увеличении 2.0, площадь поля зрения $2.21 \times 2.21 \text{ мкм}^2$

Поэтому применяется следующий способ подготовки поверхности:

1. Исходная двухдюймовая пластина покрывается слоем фоторезиста ФП-9120-1.0.
2. Производится автоматическая резка на образцы необходимого размера.
3. Защитный слой фоторезиста ФП-9120-1.0 удаляется в диметилформамиде, затем дополнительно происходит удаление остатков фоторезиста в кислородной плазме.
4. Финишная отмывка образцов с применением механической очистки, а также в деионизованной воде в ультразвуковой установке.

Изменения в проведении фотолитографического процесса (сушка, экспонирование, проявление) не повлияли на процесс взрыва, удаления излишней

металлизации не происходило. Однако изменение толщины фоторезиста привело к положительным результатам.

При использовании нового фоторезиста меньшей толщины ФП-9120-0.4 и при проведении процесса взрывной фотолитографии (экспонирование и проявление рисунка, напыление металла, удаление излишнего металла) в течение одного дня удается добиться повторяемости процесса взрывной фотолитографии, чего не удавалось добиться ранее. При использовании прошлого фоторезиста большей толщины ФП-9120-1.0 не всегда удавалось добиться полного удаления излишнего металла и создания необходимого рисунка на поверхности фотокатода.

Предполагается, что уменьшение толщины фоторезиста делает его стенки более крутыми. Поэтому удаление металла (его «взрыв») начал происходить более успешно и на данный момент воспроизводится при создании фоточувствительной области на каждом фотокатоде. Такую тенденцию также можно проследить в [23], где стенки фоторезиста становились более пологими при увеличении его толщины.

Фотолитографический рисунок, полученный с применением нового технологического подхода, является более однородным и с меньшим количеством дефектов по сравнению с образцами, полученными по старой технологии.

Для количественной оценки эффективности нового технологического подхода был проведен анализ данных по площади и проценту дефектов (таблица). Выборка из 12 образцов, сделанных с применением нового технологического подхода, показывает низкий процент по количеству дефектов от площади рабочей зоны. Здесь Н1–Н12 – образцы, изготовленные по новой технологии, С1–С3 – образцы, изготовленные по старой технологии.

Среднее значение процента дефектов при использовании измененной технологии для образцов из группы Н1–Н8 составило 0.086%, а для группы Н9–Н12 было равно 0.035%. Это в 9 раз ниже по сравнению с показателем для группы старой технологии С1–С3, который составлял 0.317%. Стандартное отклонение для новой технологии также значительно меньше – 0.039% и 0.019% против 0.127%, что указывает на высокую воспроизводимость процесса.

Из диаграммы на рис. 9 видно, что рабочая зона образцов Н9–Н12 имеет наименьший процент дефектов. При подготовке к фотолитографии данные образцы дополнительно подвергались механической отмывке после 5 мин в ультразвуковой ванне.

Таким образом, усовершенствованный технологический процесс не только снижает дефектность, но и обеспечивает более стабильные результаты при серийном производстве.

Таблица. Площадь и процент дефектов в рабочей области на фотокатоде

Номер образца	Суммарная площадь дефектов, мм ²	Процент дефектов от площади рабочей зоны 130 мм ² , %
Н1	0.059	0.05
Н2	0.107	0.01
Н3	0.073	0.06
Н4	0.102	0.08
Н5	0.080	0.06
Н6	0.102	0.08
Н7	0.031	0.02
Н8	0.395	0.04
Н9	0.020	0.02
Н10	0.076	0.06
Н11	0.020	0.02
Н12	0.076	0.06
С1	0.349	0.27
С2	0.600	0.46
С3	0.288	0.22

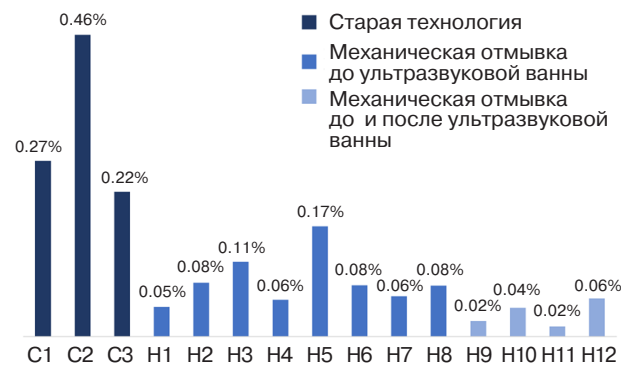


Рис. 9. Распределение доли дефектов от общей площади образцов

По сравнению с рис. 2, изображение на готовом приборе (рис. 10) значительно улучшилось. Изображение стало более однородным, черные точки от загрязнений практически отсутствуют, темные прямоугольники отсутствуют полностью.

Результаты показывают, что снижение толщины фоторезиста и исключение длительного межоперационного хранения образцов существенно уменьшают количество дефектов. Наибольший вклад в улучшение качества вносит комплекс мер: защита поверхности фоторезистом перед резкой, использование плазменной очистки, последовательное выполнение этапов экспонирования, напыления и удаления излишнего металла, а также уменьшение толщины используемого фоторезиста.

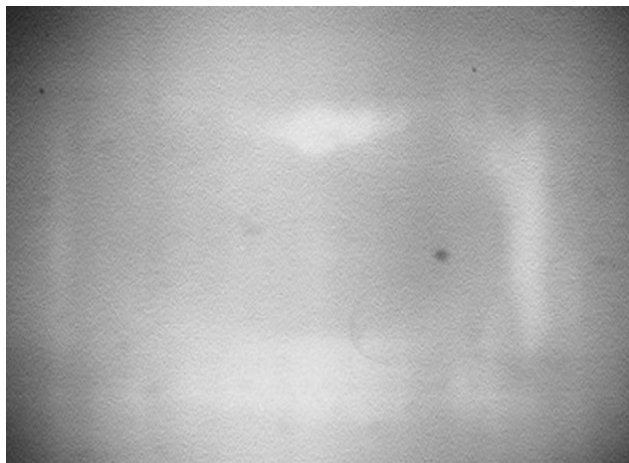


Рис. 10. Изображение готового прибора с фотокатодом, полученным по усовершенствованной технологии

Достигнутый уровень доли дефектов по данным измерений фотокатодов соответствует лучшим мировым образцам твердотельных фотоприемников ближнего ИК-диапазона IMX991 от компании SONY⁵.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена усовершенствованная технология подготовки поверхности и проведения фотолитографии для гибридных фотоприемников ближнего ИК-диапазона.

Достигнуто снижение среднего процента дефектов более чем в 9 раз – с 0.317% до 0.035%, что соответствует лучшим мировым образцам твердотельных фотоприемников ближнего ИК-диапазона.

В результате улучшено качество изображения в готовом приборе. Изображение является более однородным, с меньшим количеством дефектов (черных точек, линий и разводов).

Обеспечена высокая воспроизводимость процесса (снижение стандартного отклонения более чем в 6 раз), что позволяет масштабировать предложенную технологию для серийного производства гибридных фотоприемников ближнего ИК-диапазона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективу АО «ЦНИИ «Электрон» за помощь в проведении исследования.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the staff of NRI “Electron” for their help in conducting the research.

Вклад авторов

А.А. Егоренков – формулирование целей и задач исследования, научное руководство работой и координация выполнения исследования.

И.В. Данилова – участие в интерпретации результатов, выбор технологических маршрутов очистки поверхности, практическая отработка и оптимизация режимов на экспериментальных образцах, редактирование статьи.

М.И. Бибинова – выбор технологических маршрутов фотолитографии, практическая отработка и оптимизация режимов на экспериментальных образцах.

С.Н. Челышков – экспериментальные измерения параметров образцов и процессы напыления.

А.Н. Вязников – сбор, обработка и статистический анализ экспериментальных данных, подготовка сводных таблиц и выборок.

К.С. Баталов – разработка методики эксперимента и верификация полученных результатов.

Authors' contributions

A.A. Egorenkov – formulating the aims and objectives of the research, scientific guidance and coordinating the research.

I.V. Danilova – interpreting the results, selecting technological routes for surface cleaning, practical testing and optimizing the modes on experimental samples, editing the article.

M.I. Bibinova – selecting technological routes of photolithography, practical testing and optimizing the modes on experimental samples.

S.N. Chelyshkov – conducting experimental measurements of sample parameters and deposition processes.

A.N. Vyaznikov – collecting, processing and statistical analysis of experimental data, preparing tables and samples.

K.S. Batalov – developing the experimental methods and verifying the obtained results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криксунов Л.З. *Справочник по основам инфракрасной техники*. М.: Сов. Радио; 1978, 400 с.
2. Hansen M.P., Douglas S.M. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications. In: *Proceedings of SPIE 6939 Defense and Security Symposium (Thermosense XXX)*. 2008. P. 69390I-1–69390I-11. <https://doi.org/10.1117/12.777776>
3. Айнбунд М.Р., Егоренков А.А., Пашук А.В. Особенности изображений воды, льда, снега, предметов и человека, формируемых гибридной телевизионной камерой в ближнем инфракрасном диапазоне. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021;21(5):619–625. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625>

⁵ NPK Photonica. IMX991-AABA-C. <https://www.npk-photonica.ru/product/21366/>. Дата обращения 09.08.2025. / Accessed August 09, 2025. (In Russ.).

4. Song H., Yeo S., Jin Y., Park I., Ju H., Nalcakan Y., Kim S. Short-Wave Infrared (SWIR) Imaging for Robust Material Classification: Overcoming Limitations of Visible Spectrum Data. *Appl. Sci.* 2024;14(23):11049. <https://doi.org/10.3390/app142311049>
5. Pavlovic M.S., Milanovic P.D., Stankovic M.S., Peric D.B., Popadic I.V., Peric M.V. Deep Learning Based SWIR Object Detection in Long-Range Surveillance Systems: An Automated Cross-Spectral Approach. *Sensors.* 2022;22(7):2562. <https://doi.org/10.3390/s22072562>
6. Wilson R.H., Nadeau K.P., Jaworski F.B., Tromberg B.J., Durkina A.J. Review of short-wave infrared spectroscopy and imaging methods for biological tissue characterization. *J. Biomed. Opt.* 2015;20(3):030901. <http://doi.org/10.1117/1.JBO.20.3.030901>
7. Егоренков А.А., Зубков В.И., Соломонов А.В., Миронов Д.Е., Пашук А.В., Айнбург М.Р. Гибридный матричный фотоприемник для ИК-области спектра. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ».* 2021;4:15–22. <https://www.elibrary.ru/wvtgwi>
8. Enloe W., Sheldon R., Reed L., Amith A. Electron-bombarded CCD image intensifier with a GaAs photocathode. In: *Proceedings of Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology.* 1992. P. 41–49. <https://doi.org/10.1117/12.60337>
9. Zhang Y., Chen J., Yang J., Fu M., Cao Y., Dong M., Yu J., Dong S., Yang X., Shao L., Hu Z., Cai H., Liu C., Huang F. Sensitive SWIR Organic Photodetectors with Spectral Response Reaching 1.5 μm . *Adv. Mater.* 2024;36(41):2406950. <https://doi.org/10.1002/adma.202406950>
10. Costello K.A., Davis G.A., Weiss R.E., Aebi V.W. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron, In: *Proceedings SPIE 1449 (Electron Image Tubes and Image Intensifiers II).* 1991. P. 40–50. <https://doi.org/10.1117/12.44264>
11. Мусатов А.Л., Израэлянец К.Р., Коротких В.Л., Филиппов С.Л., Руссу Е.В., Дякону И.И. Эмиссионные характеристики полупроводниковых гетероструктур с барьером Шоттки InGaAs-InP-Ag. *Физика и техника полупроводников,* 1990;24(9):1523–1530.
12. Aebi V., Costello K., Davis G., LaRue R., Weiss R. Near IR Photocathode Development. In: *Proceedings of 1997 Meeting of the IRIS Specialty Group on Active System.* 1997. Tucson. US.
13. Wang X., Shi M., Su L., Yang L., Deng X., Zhang Y., Tan H. NEA GaAs photocathode for electron source: From growth, cleaning, activation to performance. *Mater. Today Phys.* 2025;52:101680. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2025.101680>
14. Sun Y., Liu Z., Pianetta P. Surface dipole formation and lowering of the work function by Cs adsorption on InP(100) surface. *Vac. Sci. Technol. A.* 2007;25(5):1351–1356. <https://doi.org/10.1116/1.2753845>
15. Долгих А.В., Леонов И.А. Сканирующая эллипсометрия высокого разрешения как метод контроля чистоты поверхности ОЭС-фотокаодов при производстве электронно-оптических преобразователей. *Прикладная физика.* 2007;4:121–123. <https://www.elibrary.ru/iadlst>
16. Терещенко О.Е., Шайблер Г.Э., Ярошевич А.С., Шевелев С.В., Терехов А.С., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Бесюлькин А.И. Низкотемпературная методика очистки поверхности p-GaN(0001) для фотозмиттеров с эффективным отрицательным электронным сродством. *Физика твердого тела.* 2004;46(10):1881–1885. <https://www.elibrary.ru/rczyer>
17. Machuca F., Liu Z., Sun Y., Pianetta P., Spicer W.E., Pease R.F.W. Simple method for cleaning gallium nitride (0001). *Am. Vac. Soc. A.* 2002;20(5):1784–1786. <https://doi.org/10.1116/1.1503782>
18. Pastuszka S., Terekhov A.S., Wolf A. ‘Stable to unstable’ transition in the (Cs, O) activation layer on GaAs (100) surfaces with negative electron affinity in extremely high vacuum. *Appl. Surf. Sci.* 1996;99(4):361–365. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(96\)00106-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(96)00106-7)
19. Jin M., Zhang Y., Chen X., Hao G., Chang B., Shi F. Effect of surface cleaning on spectral response for InGaAs photocathodes. *Appl. Opt.* 2015;54(36):10630–10635. <https://doi.org/10.1364/AO.54.010630>
20. Choi I-C., Kim H-T., Yerriboina N.P., Lee J.H., Teugels L., Kim T-G., Park J-G. Post-CMP Cleaning of InGaAs Surface for the Removal of Nanoparticle Contaminants for Sub-10nm Device Applications. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2019;8(5):3028–3034. <https://doi.org/10.1149/2.0051905jss>
21. Na J., Lim S. Elemental behaviors of InGaAs surface after treatment in aqueous solutions. *Microelectron. Eng.* 2019;212: 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.04.002>
22. Brussaard G.J.H., Letourneur K.G.Y., Schaepkens M., van de Sanden M.C.M., Schram D.C. Stripping of photoresist using a remote thermal Ar/O₂ and Ar/N₂/O₂ plasma. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2003;21(1):61–66. <https://doi.org/10.1116/1.1532021>
23. Kim J.H., Choi N., Kim Y.-H., Kim T.-S. Thickness dependence of the lithographic performance in 193nm photoresists. In: *Proceedings of SPIE 6153, Advances in Resist Technology and Processing XXIII.* 2006. V. 615337. <https://doi.org/10.1117/12.655777>

REFERENCES

1. Kriksunov L.Z. *Spravochnik po osnovam infrakrasnoi tekhniki (Handbook of the Fundamentals of Infrared Technology).* Moscow: Sovetskoe Radio; 1978, 400 p. (In Russ.).
2. Hansen M.P., Douglas S.M. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications. In: *Proceedings of SPIE 6939 Defense and Security Symposium (Thermosense XXX).* 2008. P. 69390I-1–69390I-11. <https://doi.org/10.1117/12.777776>
3. Ainbund M.R., Egorenkov A.A., Pashuk A.V. Features of images of water, ice, snow, objects and a human formed by a hybrid television camera in the near-infrared range. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics.* 2021;21(5):619–625 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625>

4. Song H., Yeo S., Jin Y., Park I., Ju H., Nalcakan Y., Kim S. Short-Wave Infrared (SWIR) Imaging for Robust Material Classification: Overcoming Limitations of Visible Spectrum Data. *Appl. Sci.* 2024;14(23):11049. <https://doi.org/10.3390/app142311049>
5. Pavlovic M.S., Milanovic P.D., Stankovic M.S., Peric D.B., Popadic I.V., Peric M.V. Deep Learning Based SWIR Object Detection in Long-Range Surveillance Systems: An Automated Cross-Spectral Approach. *Sensors.* 2022;22(7):2562. <https://doi.org/10.3390/s22072562>
6. Wilson R.H., Nadeau K.P., Jaworski F.B., Tromberg B.J., Durkina A.J. Review of short-wave infrared spectroscopy and imaging methods for biological tissue characterization. *J. Biomed. Opt.* 2015;20(3):030901. <http://doi.org/10.1117/1.JBO.20.3.030901>
7. Egorenkov A.A., Zubkov V.I., Solomonov A.V., Mironov D.E., Pashuk A.V., Ainbund M.R. Hybrid matrix photodetector for infrared spectral range. *Izvestiya SPbGETU "LETP" = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University.* 2021;4:15–22 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wvtgwi>
8. Enloe W., Sheldon R., Reed L., Amith A. Electron-bombarded CCD image intensifier with a GaAs photocathode. In: *Proceedings of Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology.* 1992. P. 41–49. <https://doi.org/10.1117/12.60337>
9. Zhang Y., Chen J., Yang J., Fu M., Cao Y., Dong M., Yu J., Dong S., Yang X., Shao L., Hu Z., Cai H., Liu C., Huang F. Sensitive SWIR Organic Photodetectors with Spectral Response Reaching 1.5 μm . *Adv. Mater.* 2024;36(41):2406950. <https://doi.org/10.1002/adma.202406950>
10. Costello K.A., Davis G.A., Weiss R.E., Aebi V.W. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron, In: *Proceedings SPIE 1449 (Electron Image Tubes and Image Intensifiers II).* 1991. P. 40–50. <https://doi.org/10.1117/12.44264>
11. Musatov A.L., Izraelyants K.R., Korotkikh V.L., Filippov S.L., Russu E.V., Dyakonov I.I. Emission characteristics of semiconductor heterostructures with a Schottky barrier InGaAs-InP-Ag. *Phizika i tehnika polyprovodnikov = Physics and Technics of Semiconductors.* 1990;24(9):1523–1530 (in Russ.).
12. Aebi V., Costello K., Davis G., LaRue R., Weiss R. Near IR Photocathode Development. In: *Proceedings of 1997 Meeting of the IRIS Specialty Group on Active System.* 1997. Tucson. US.
13. Wang X., Shi M., Su L., Yang L., Deng X., Zhang Y., Tan H. NEA GaAs photocathode for electron source: From growth, cleaning, activation to performance. *Mater. Today Phys.* 2025;52:101680. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2025.101680>
14. Sun Y., Liu Z., Pianetta P. Surface dipole formation and lowering of the work function by Cs adsorption on InP(100) surface. *Vac. Sci. Technol. A.* 2007;25(5):1351–1356. <https://doi.org/10.1116/1.2753845>
15. Dolgikh A.V., Leonov I.A. High resolution scanning ellipsometry as test method of NEA-photocathode surface cleanliness in image intensifier tubes manufacture. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics.* 2007;4:121–123 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/iadlst>
16. Tereshchenko O.E., Shaibler G.É., Yaroshevich A.S., et al. Low-temperature method of cleaning *p*-GaN(0001) surfaces for photoemitters with effective negative electron affinity. *Phys. Solid State.* 2004;46(10):1949–1953. <https://doi.org/10.1134/1.1809437>
[Original Russian Text: Tereshchenko O.E., Shaibler G.É., Yaroshevich A.S., Shevelev S.V., Terekhov A.S., Lundin V.V., Zavarin E.E., Besyulkin A.I. Low-temperature method of cleaning *p*-GaN(0001) surfaces for photoemitters with effective negative electron affinity. *Fizika Tverdogo Tela.* 2004;46(10):1881–1885 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/rczyer>]
17. Machuca F., Liu Z., Sun Y., Pianetta P., Spicer W.E., Pease R.F.W. Simple method for cleaning gallium nitride (0001). *Am. Vac. Soc. A.* 2002;20(5):1784–1786. <https://doi.org/10.1116/1.1503782>
18. Pastuszka S., Terekhov A.S., Wolf A. ‘Stable to unstable’ transition in the (Cs, O) activation layer on GaAs (100) surfaces with negative electron affinity in extremely high vacuum. *Appl. Surf. Sci.* 1996;99(4):361–365. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(96\)00106-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(96)00106-7)
19. Jin M., Zhang Y., Chen X., Hao G., Chang B., Shi F. Effect of surface cleaning on spectral response for InGaAs photocathodes. *Appl. Opt.* 2015;54(36):10630–10635. <https://doi.org/10.1364/AO.54.010630>
20. Choi I-C., Kim H-T., Yerriboina N.P., Lee J.H., Teugels L., Kim T-G., Park J-G. Post-CMP Cleaning of InGaAs Surface for the Removal of Nanoparticle Contaminants for Sub-10nm Device Applications. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2019;8(5): 3028–3034. <https://doi.org/10.1149/2.0051905jss>
21. Na J., Lim S. Elemental behaviors of InGaAs surface after treatment in aqueous solutions. *Microelectron. Eng.* 2019;212: 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.04.002>
22. Brussaard G.J.H., Letourneur K.G.Y., Schaepkens M., van de Sanden M.C.M., Schram D.C. Stripping of photoresist using a remote thermal Ar/O₂ and Ar/N₂/O₂ plasma. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2003;21(1):61–66. <https://doi.org/10.1116/1.1532021>
23. Kim J.H., Choi N., Kim Y.-H., Kim T.-S. Thickness dependence of the lithographic performance in 193nm photoresists. In: *Proceedings of SPIE 6153, Advances in Resist Technology and Processing XXIII.* 2006. V. 615337. <https://doi.org/10.1117/12.655777>

Об авторах

Егоренков Артём Александрович, начальник научно-исследовательского отдела, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: a.egorenkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

Данилова Ирина Владимировна, инженер, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: i.danilova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-7160-8308>

Бибинова Мария Ивановна, инженер-технолог, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: m.bibinova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0007-0006-867X>

Челышков Сергей Николаевич, инженер, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: s.chelyshkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0664-1808>

Вязников Алексей Николаевич, генеральный директор, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: a.vyaznikov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0003-7248-5852>

Баталов Константин Сергеевич, заместитель начальника научно-исследовательского отдела, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: k.batalov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4140-8794>

About the Authors

Artyom A. Egorenkov, Head of Scientific Research Department, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: a.egorenkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

Irina V. Danilova, Engineer, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: i.danilova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-7160-8308>

Maria I. Bibinova, Engineer, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: m.bibinova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0007-0006-867X>

Sergei N. Chelyshkov, Engineer, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: s.chelyshkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0664-1808>

Alexei N. Vyaznikov, CEO, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: a.vyaznikov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0003-7248-5852>

Konstantin S. Batalov, Deputy Head of the Research Department, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: k.batalov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4140-8794>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 004.832.32
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-80-102>
EDN LLZOKJ



ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Физически неклонировуемые функции в цифровых интегральных схемах

Е.Ф. Певцов[@], Т.А. Деменкова, Ю.А. Коротаев[@], А.С. Сигов

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Авторы для переписки, e-mail: pevtsov@mirea.ru, korotaevya@yandex.ru

• Поступила: 16.09.2025 • Доработана: 23.09.2025 • Принята к опубликованию: 12.02.2026

Резюме

Цели. Преимуществом модулей, реализующих физически неклонировуемые функции (ФНФ) и встроенных в цифровой чип, является то, что отклики на запросы могут быть напрямую использованы другими приложениями устройства. Устройство способно запрашивать и считывать ФНФ без привлечения внешних инструментов и вывода запроса и ответа за пределы чипа. ФНФ может быть реализована с использованием технологических операций и компонентов, применяемых при изготовлении самого устройства. Статья является первой из двух обзорных публикаций, посвященных ФНФ как компонентам инфраструктуры аппаратной безопасности. Данная статья фокусируется на формальном описании ФНФ и их конструкциях, основанных на модулях памяти и анализе временных характеристик сигналов.

Методы. Используются методы определения количественных показателей и признаков для формального описания ФНФ: вычислимость, уникальность, возможность реализации, сложность клонирования, защита от несанкционированного доступа.

Результаты. Рассмотрены реализации ФНФ как физических устройств, обладающих уникальной сигнатурой. Предложена их классификация: ФНФ на основе временных характеристик сигналов, ФНФ на основе схем памяти и аналоговые ФНФ. Приведены наиболее типичные примеры реализаций первых двух типов. Показано, что решения на основе задержек сигналов обеспечивают широкое пространство пар «запрос – ответ», но требуют симметрии и/или калибровки, тогда как ФНФ на базе памяти проще реализуются в интегральных схемах и при корректной постобработке достигают высокой воспроизводимости, что делает их практичным выбором для многих приложений. Описаны подходы к компенсации влияния вариаций напряжения и температуры. Приведены примеры «сильных» память-ориентированных ФНФ и схемотехнические приемы повышения их стойкости к атакам.

Выводы. Технология обеспечения безопасности на основе ФНФ обладает значительным потенциалом, особенно для применения в устройствах интернета вещей. Проведенный анализ показывает, что в сочетании с методами постобработки и компенсации эксплуатационных факторов ФНФ является зрелым инструментом обеспечения аппаратной безопасности.

Ключевые слова: физически неклонировуемая функция, ФНФ, интегральные схемы, аппаратная безопасность, ФНФ типа «арбитр», ФНФ на основе памяти, SRAM, DRAM, интернет вещей

Для цитирования: Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Коротаев Ю.А., Сигов А.С. Физически неклонироваемые функции в цифровых интегральных схемах. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):80–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-80-102>, <https://www.elibrary.ru/LLZOKJ>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Physically unclonable functions in digital integrated circuits

Evgenii Ph. Pevtsov[@], Tatyana A. Demenkova,
Yuri A. Korotaev[@], Alexander S. Sigov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding authors, e-mail: pevtsov@mirea.ru, korotaevya@yandex.ru

• Submitted: 16.09.2025 • Revised: 23.09.2025 • Accepted: 12.02.2026

Abstract

Objectives. Modules that implement physically unclonable functions (PUFs) within a digital chip facilitate the direct use of challenge–response pairs by device applications that can query and read the PUF without external tools or exposing data outside the chip. A PUF can be implemented using technological processes and components already applied in device fabrication. The first of two reviews on PUFs as elements of hardware security infrastructure, the present paper focuses on the formal description of PUFs and designs based on memory modules and timing analysis.

Methods. The following quantitative indicators were applied to formally describe PUFs: computability, uniqueness, feasibility, cloning resistance, and protection against unauthorized access.

Results. PUFs are considered as physical devices with unique signatures. A classification into three PUF groups is proposed: delay-based, memory-based, and analog. Typical examples of the first two groups are outlined. While delay-based solutions provide a large challenge–response space, they require symmetry and/or calibration. In contrast, memory-based PUFs are easier to implement in integrated circuits. With suitable post-processing, they can achieve high reproducibility, making them practical for many applications. Approaches to mitigating voltage and temperature variations are described along with examples of strong memory-oriented PUFs and circuit techniques that enhance resistance to attacks.

Conclusions. PUF-based security technologies demonstrate significant potential, particularly for the Internet of Things. When combined with post-processing and compensation methods, PUFs constitute a mature and effective tool for hardware security.

Keywords: physically unclonable function, PUF, integrated circuits, hardware security, arbiter PUF, memory-based PUF, SRAM, DRAM, Internet of Things

For citation: Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A., Korotaev Yu.A., Sigov A.S. Physically unclonable functions in digital integrated circuits. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):80–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-80-102>, <https://www.elibrary.ru/LLZOKJ>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие конфиденциальной и интеллектуальной информации в аппаратных устройствах, предназначенных для выполнения специализированных задач искусственного интеллекта, делает их выгодной мишенью для хакерских атак. Злоумышленник может нарушить безопасность аппаратных средств, перехватить информацию для получения финансовой выгоды и украсть интеллектуальную собственность для проведения обратного проектирования с целью производства поддельных клонированных устройств. Помимо клонированных подделок, переработанные и восстановленные устройства могут продаваться как новые, что приводит к потере доходов производителями и возникновению проблем с безопасностью из-за сокращения срока их службы и надежности.

Одно из возможных решений для обеспечения безопасности оборудования заключается в физическом внедрении защищенных схем для аутентификации устройства, генерации случайного ключа доступа и других, все более усложняющихся способов защиты от подделок. Схемы защиты обладают уникальной сигнатурой, аналогичной отпечаткам сетчатки/пальцев человека и ДНК¹. Эти сигнатуры являются случайными, их трудно предсказать и достаточно сложно клонировать, что предотвращает несанкционированный доступ к данным. Таким образом, актуальной является тема реализации надежных аппаратных платформ для безопасной связи, аутентификации устройств и защиты от разнообразных программных и аппаратных рисков и атак хакеров.

Физически неклонируемая функция (ФНФ) представляет собой физический объект, работа которого не может быть воспроизведена («клонирована») физическим способом (путем создания другой системы с использованием той же технологии), который для заданных входных данных и условий (запроса) обеспечивает физически определенный выходной сигнал (ответ) «цифрового отпечатка пальца», являющийся уникальным идентификатором конкретного экземпляра устройства. Это актуально для применения в приложениях с высокими требованиями к безопасности, например, в криптографии, устройствах интернета вещей и для защиты конфиденциальности.

Согласно определению, ФНФ выполняет функциональную операцию, т.е. при запросе с определенными входными данными она выдает результат, поддающийся измерению или оценке. Следует рассматривать ФНФ как функцию в инженерном

смысле, т.е. процедуру, выполняемую конкретной (физической) системой или воздействующую на нее. Как правило, входные данные для ФНФ называются запросом, на который на выходе формируется некий ответ. Выполненный запрос и измеренный ответ на него обычно называются парой «запрос – ответ» (challenge to response pair, CRP), а соотношение, устанавливаемое между запросами и ответами с помощью конкретной реализации ФНФ, описывает процедуру реализации CRP.

Тема ФНФ широко освещается в научной литературе, в частности, из-за очевидной необходимости обеспечения безопасности устройств интернета вещей [1]. В настоящей работе обобщаются результаты, изложенные в основном в последних публикациях о современных ФНФ и их реализациях [2–4].

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФНФ

Наиболее полное описание свойств, по которым можно оценивать различные реализации ФНФ, приведено в работах [5–7]. Как в рамках одного типа ФНФ, так и для сравнения разных типов ФНФ между собой применяются понятия теории классификации и идентификации.

Для набора мгновенных воздействий конкретной конструкции ФНФ применяются следующие два типа количественных показателей.

- Количественная оценка между двумя различными экземплярами, реализующими конкретную ФНФ – это разность между двумя ответами, полученными в результате однократного применения запроса к обеим реализациям ФНФ. Согласно классификации, предложенной в работе [7], соответствующее обозначение этой метрики – *inter-distance*. Следовательно, это случайная величина, описывающая расстояние между двумя ответами ФНФ от разных экземпляров ФНФ, использующих один и тот же вызов.
- Количественная характеристика, описывающая отличия между двумя оценками в одном экземпляре ФНФ – это разность между двумя разными ответами, полученными в результате двукратного применения запроса к одной реализации ФНФ. В этом случае метрика обозначается как *intra-distance*. Это случайная величина, описывающая расстояние между двумя ответами ФНФ, полученными от одного и того же экземпляра ФНФ и использующими один и тот же вызов.
- Воспроизводимость и уникальность ФНФ определяются этими показателями. Для обеих метрик применяется один и тот же запрос. При этом конкретное значение количественных характеристик для одного экземпляра или для разных

¹ Дезоксирибонуклеиновая кислота. [Deoxyribonucleic acid.]

экземпляров ФНФ может варьироваться в зависимости от сложности и количества испытаний, т.е. используемая мера количественных оценок может варьироваться в зависимости от характера реакции. В частности, в случаях, когда ответом является битовая строка, в качестве критерия используется расстояние Хэмминга (inter-Hamming distance, inter-HD).

Для конкретного типа ФНФ характеристики inter-distance и intra-distance часто обобщаются в виде гистограмм, иллюстрирующих результаты выполнения нескольких запросов для одного устройства с ФНФ и результаты, наблюдаемые при выполнении ряда различных запросов для нескольких однотипных устройств с ФНФ. Как указано в работе [6], во многих случаях обе гистограммы могут быть аппроксимированы гауссовым распределением с указанием их средних значений, соответственно μ_{inter} и μ_{intra} , и, при наличии, их стандартных отклонений, соответственно σ_{inter} и σ_{intra} .

Из определения следует, что μ_{intra} выражает средний уровень шума в ответах, т.е. характеризует воспроизводимость измеренного ответа по сравнению с другими наблюдениями того же ответа. Очевидно, что чем меньше значение μ_{intra} , тем более надежные ответы реализует данная ФНФ. С другой стороны, μ_{inter} выражает понятие уникальности, т.е. измеряет среднюю различимость двух систем на основе их ответов ФНФ. Если ответы представляют собой битовые строки, то наилучшая различимость, которой можно достичь – это если отличается в среднем половина битов. В частности, если μ_{inter} выражается как относительное значение расстояния Хэмминга, наилучшим результатом является значение, близкое к 50%. На практике одновременная реализация

минимума μ_{intra} и 50% μ_{inter} является задачей компромисса применяемых методов реализации ФНФ. Практическое применение обоих понятий иллюстрируется рис. 1 [6], на котором показан пример использования ФНФ для целей идентификации.

Получение ответа ФНФ, как правило, связано с физическим измерением, следовательно, существует ряд нежелательных побочных физических эффектов, которые могут повлиять на результат. Очевидными причинами является случайный шум и погрешности измерений. В результате один и тот же запрос не обязательно вызывает один и тот же ответ, что приводит к так называемой внутренней дистанции (см. определение intra-distance) между ответами ФНФ. Внешние факторы также оказывают систематическое влияние на измерение отклика, например, температура или напряжение питания в случае, когда ФНФ реализуется в интегральной схеме (ИС). Таким образом, для корректного сравнения различных результатов из литературных источников необходимо учитывать, в каких условиях получены значения μ_{intra} . Пример влияния температуры на воспроизводимость ФНФ приведен в работе [8]. Если воздействие окружающей среды носит систематический характер, могут быть применены методы, позволяющие снизить его влияние на реакцию ФНФ. Другими возможными вариантами являются введение компенсирующих коэффициентов [9] и специальные стратегии реализации ФНФ, минимизирующие зависимость от окружающей среды [7, 10].

С точки зрения эффективности применения ФНФ могут быть классифицированы как «слабые» и «сильные». ФНФ считается «слабой», если существует всего несколько комбинаций CRP с реакциями, которые, как правило, мало

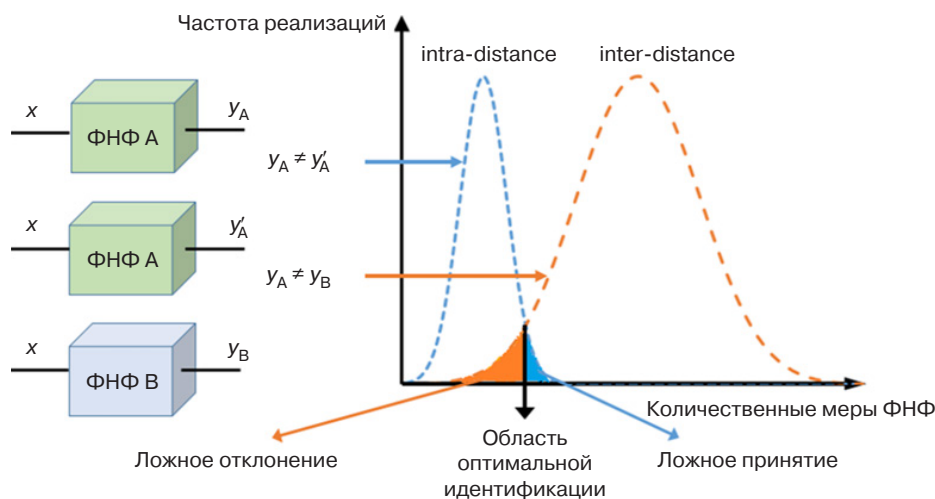


Рис. 1. Количественные характеристики ФНФ [6].
 x – запрос, y_A, y'_A – ответы конкретного экземпляра ФНФ на запрос;
 y_B – ответ другого экземпляра ФНФ на тот же запрос

чувствительны к изменениям окружающей среды. Хотя в «слабых» ФНФ относительно мала устойчивость к атакам хакеров, они используются для создания секретных ключей из-за их высокой стабильности. В случае «сильной» ФНФ, реализующее ее устройство имеет достаточно большое количество CRP, так что злоумышленник не сможет в реальное время разрушить систему идентификации. В связи с этим при физической реализации ФНФ следует повышенное внимание уделять защите от атак на вскрытие ФНФ, в частности, применяющих методы машинного обучения.

Стандартной процедурой характеристики ФНФ является прохождение статистических тестов, целью которых является определение меры случайности двоичных последовательностей, порожденных либо аппаратными, либо программными генераторами случайных чисел. Эти тесты разработаны Лабораторией информационных технологий (Information Technology Laboratory), являющейся главной исследовательской лабораторией Национального института стандартов и технологий², и основаны на различных статистических свойствах, присущих только случайным последовательностям.

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ФНФ

Одна из попыток формального описания ФНФ, основанная на описании физической процедуры реагирования на запросы, предпринята в работе [7]. Создание экземпляра ФНФ не может быть просто абстрактным понятием, но всегда связано с конкретным физическим объектом. ФНФ – это процедура Π , представляемая некоторой функциональностью ввода-вывода, которую формально можно выразить как преобразование «запрос – ответ» ФНФ $\Pi: X \rightarrow Y: \Pi(x)$. Формально процедуру «запрос – ответ» можно отнести к ФНФ, если она характеризуется следующими свойствами:

1. Вычислимость: при заданных процедурах Π и аргументах x из множества X есть способ вычислить $Y = \Pi(x)$ за полиномиальное алгоритмическое время. Это означает, что необходимо, чтобы создание ФНФ было возможно с минимальными усилиями, например, в условиях ограниченного времени, площади, мощности и энергопотребления при интегрировании в чип. Ясно, что если ФНФ поддается вычислению, то подразумевается, что она может быть сконструирована. Также, очевидно, что все варианты ФНФ, которые предоставляют экспериментальные результаты,

могут быть сконструированы и, по крайней мере, теоретически оценены.

2. Уникальность: $\Pi(x)$ содержит некоторую информацию об идентичности физического объекта, реализующего Π . Если рассматривается четко определенный набор или совокупность экземпляров ФНФ, то информация, содержащаяся в ответе $\Pi(x)$ ФНФ, позволяет осуществить идентификацию, которую можно произвести из совокупности на основе этого ответа. Последовательные ответы позволяют создавать все меньшие и меньшие неопределенности идентификации до тех пор, пока оптимально не останется объект с одним экземпляром ФНФ, и в этом случае рассматриваемый набор «запрос – ответ» будет уникальным для идентификации ФНФ в рассматриваемом множестве объектов. Исходя из размера множества и характеристик ответов ФНФ, такая уникальная идентификация может быть возможной, а может и не быть. Одним из возможных показателей уникальности, который приводится в большинстве экспериментальных результатов, является гистограмма промежуточных метрик *inter-distance*, суммируемая по их среднему значению μ_{inter} .
3. Воспроизводимость: $y = \Pi(x)$ воспроизводится с погрешностью, достаточной для идентификации ФНФ. Ответы на различные запросы x в одной и той же Π ФНФ должны быть близки по рассматриваемому показателю метрики различий ответов. При интерпретации экспериментальных результатов они в основном измеряются с помощью гистограммы внутренней метрики *intra-distance* и суммируются по его среднему значению μ_{intra} . Воспроизводимость – это свойство, которое отличает ФНФ от настоящих генераторов случайных чисел (true random number generator, TRNGs).
4. Неклонированность: для заданной процедуры Π не существует другой процедуры Γ , не эквивалентной Π , такой, чтобы $\forall x \in X \Gamma(x) \approx \Pi(x)$ с точностью до погрешности реализации. Следует принять во внимание, что процедура клонирования Γ необязательно физически реализуема, т.е. различаются физическая и математическая неклонированности. Если трудно найти физический объект, содержащий другую ФНФ $\Pi_\Gamma \neq \Pi$, такой, что $\forall x \in X \Pi_\Gamma(x) \neq \Pi(x)$, утверждается, что реализация Π физически невозможна. Сложность создания физического клона сохраняется даже для производителя оригинальной ФНФ. В этом случае она называется стойкостью производителя. Если трудно придумать (абстрактную) математическую процедуру f_Γ , такую, что $\forall x \in X f_\Gamma(x) \approx \Pi(x)$,

² The National Institute of Standards and Technology, NIST. <https://www.nist.gov/>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

утверждается, что Π математически неопределима. Физическая и математическая неклонированности – это принципиально разные свойства, конструкция может быть легко клонирована физически, но не математически, или наоборот. Для того, чтобы ФНФ была действительно неклонированной, процедура реализации Π должна быть как физически, так и математически неклонированной. Следует отметить, что физическое клонирование может быть очень трудным или неосуществимым, при этом теоретически доказать неклонированность очень сложно. Очевидно, что системы, основанные на квантовой физике, теоретически не поддаются клонированию.

5. Непредсказуемость: для набора процедур $Q = \{f(x_p, y_i) = \Pi(x_i)\}$, с точностью до погрешности, нельзя определить $y_c \approx \Pi(x_c)$ для случайного запроса x_c (random challenge), такого, что $(x_c) \notin Q$. Если возможно точно предсказать ответ ФНФ для случайного запроса, просто наблюдая за набором CRP, то легко создать математический клон при наличии доступа к полному каталогу вариантов ответов ФНФ.
6. Односторонность: для аргументов y и процедур Π с точностью до погрешности нельзя найти x , такое, чтобы $\Pi(x) = y$. В некоторых работах ФНФ упрощенно описываются как физический вариант односторонних функций, применяемый для объектов криптографии [11].
7. Очевидность вмешательства: изменение физического объекта, описываемого процедурой Π при внедрении преобразующего $\Pi \rightarrow \Pi'$ таким образом, что с высокой вероятностью справедливо $\forall x \in X \Pi(x) \neq \Pi'(x)$ даже с точностью до погрешности реализации Π . Следует различать системы защиты от несанкционированного доступа, т.е. системы, в которых вмешательство не приводит к получению какой-либо полезной информации, и системы, в которых вмешательство очевидно и вредно, т.е. системы, в которых вмешательство в физический объект, содержащий ФНФ, изменяет поведение CRP.

РЕАЛИЗАЦИИ ФНФ, ОСНОВАННЫЕ НА АНАЛИЗЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ

Большим преимуществом ФНФ, встроенной в цифровой чип, является то, что отклики на запросы могут быть напрямую использованы другими приложениями, работающими на том же устройстве. В частности, устройство может запрашивать и считывать свою собственную ФНФ без необходимости использования внешних инструментов и без необходимости того, чтобы запрос и ответ покидали

устройство. С другой стороны, ФНФ может быть реализована с использованием только технологических операций и компонентов, которые применяются при изготовлении самого устройства, в котором размещен узел ФНФ, что практически не требует дополнительных затрат.

В обзорных публикациях [2, 3, 12–18] приведено несколько вариантов классификаций ФНФ: по времени появления первых разработок, по физическим конструктивным (гибридным или полностью электронным) свойствам и технологиям реализации (электронные, оптические, радиочастотные, магнитные), размерам пар CRP, области применения и т.д. Обобщая эти классификации, условно реализации ФНФ в ИС можно разделить на три основных типа: 1) на основе временных характеристик сигналов; 2) на основе схем памяти; 3) аналоговые и пассивные.

ФНФ на основе кольцевых осцилляторов (RO-PUF³)

В этих устройствах для формирования ФНФ используется эффект рассогласования частот кольцевых генераторов, построенных на инверторах [19]. Из-за производственных вариаций два номинально идентичных кольцевых генератора, реализованные на одном кристалле, будут иметь фиксируемую разность частот. Как показано на рис. 2, в RO-PUF закладывается массив из N таких осцилляторов.

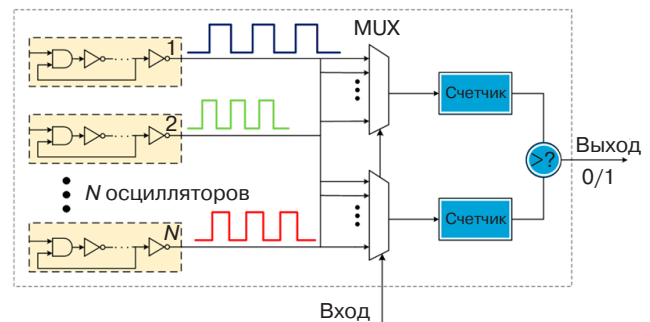


Рис. 2. Пример реализации ФНФ на основе кольцевого осциллятора [3].
MUX – мультиплексор

Результат сравнения частот двух кольцевых генераторов формирует бит ответа. Запрос заключается в количестве или расположении кольцевых генераторов, а ответной реакцией является результат разности частот их колебаний. Для надежного сравнения частот применяются счетчики, подсчитывающие число импульсов каждого осциллятора за заданный временной интервал. Альтернативный подход – подключать выходы двух генераторов на входы RS-триггера⁴.

³ Ring oscillator physical unclonable function (PUF).

⁴ R (reset) – сброс, S (set) – установка.

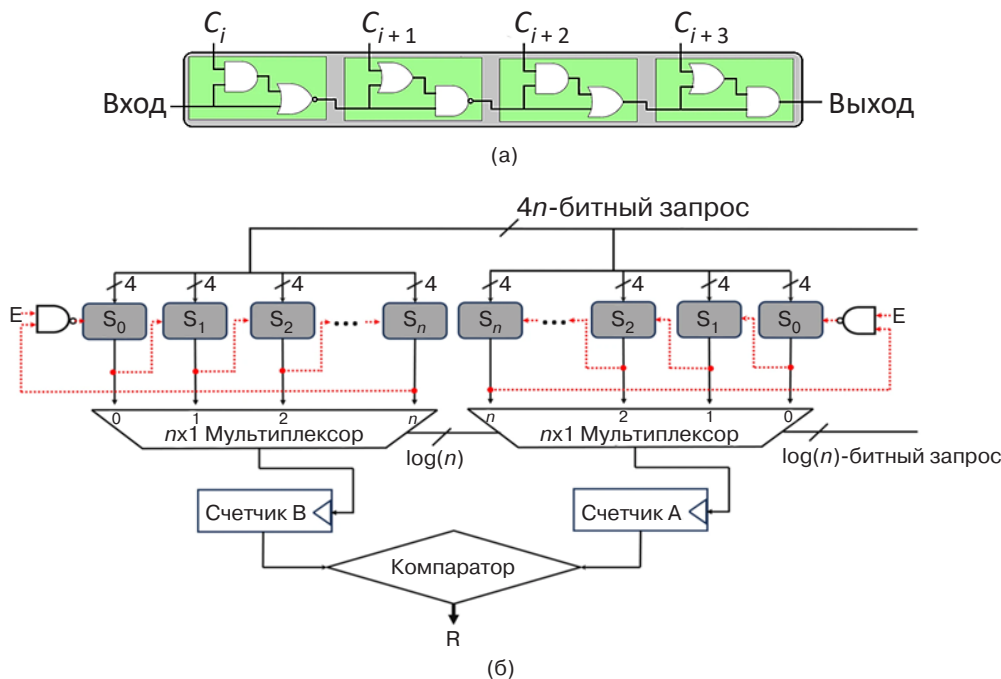


Рис. 3. Микроархитектура RO-PUF: (а) модуль формирования задержки, (б) устройство формирования бита ответа на конфигурируемый 4-разрядный запрос [24].
 C_i, \dots, C_{i+3} – challenges (запросы); E – enable (сигнал разрешения);
 $n \times 1$ – мультиплексор с n входами и 1 выходом; R – response (ответ)

Реализации RO-PUF демонстрируют умеренную сложность: схема состоит из повторяющихся блоков генераторов и простых цифровых счетчиков/компараторов. Для получения N бит необходимо, по меньшей мере, порядка $2N$ генераторов (каждый бит требует уникальной пары RO⁵). Часто используют более экономичные схемы, например, сортируют частоты множества RO и генерируют множество бит, сравнивая различные пары в упорядоченном списке – это позволяет получить несколько бит из N генераторов, но может усложнить анализ. Согласно [3] уникальность хорошо спроектированного RO-PUF близка к 50% – случайные разбросы частот дают равновероятное превосходство одного генератора над другим. Повторяемость также может быть высокой: если разница частот выбранных пар достаточно велика, то порядок их сравнения сохраняется даже при изменениях температуры и напряжения. В экспериментах достигается надежность 95–99%. Тем не менее, при неблагоприятных условиях (например, при сближении частот из-за температурного дрейфа) некоторые биты ответов могут инвертироваться, поэтому для повышения надежности вводят запас по частоте или используют кодирование ответов.

Масштабирование RO-PUF на более высокие частоты в современных техпроцессах требует учета увеличения флуктуаций периода, поскольку на нанометровых нормах шум может вносить

ошибки, сравнимые с разницей частот кольцевых генераторов.

В работах [20, 21] продемонстрирована успешная реализация RO-PUF в FPGA⁶. В настоящее время предложено несколько разработок, направленных на улучшение характеристик RO-PUF, переводящих их в разряд сильных ФНФ [22]. В работах [23, 24] описывается архитектура конфигурируемого RO-PUF, в которой используются изменения частоты и фазового сдвига, а каждый блок задержки S_0, \dots, S_n выполнен из логических элементов, сформированных парами n - и p -MOS⁷ транзисторов так, что суммарное время задержки возрастает в соответствии с ужесточением технологических допусков на их изготовление. На примере, приведенном на рис. 3а, каждый блок задержки S сконфигурирован для формирования 4-разрядного запроса. На рис. 3б N каскадов задержки включены последовательно, причем выходные данные каждого из них применяются для переключения сигналов запуска счетчиков, значения которых сравниваются компаратором для выдачи сигнала ответа.

Предлагаемая конструкция устраняет дублирование кольцевых генераторов, снижает коммутационную активность и вносит межкаскадную задержку в качестве дополнительного источника случайности. Предложенный ФНФ был реализован в 22-нм режиме

⁶ Field-programmable gate array – программируемая пользователем вентильная матрица.

⁷ Metal-oxide-semiconductor – металл-оксид-полупроводник.

⁵ Ring oscillator – кольцевой осциллятор.

по технологии FD SOI⁸ с использованием инструментов Synopsys⁹. Результаты испытаний на 8 чипах успешно прошли тесты NIST, значения intra-HD и inter-HD (внутреннее и внешнее расстояния Хэмминга соответственно) составили 9.95% и 45.5% соответственно.

Другой вариант ФНФ с конфигурируемым кольцевым осциллятором (ККО ФНФ) предложен в работе [25]. ФНФ выполнена как модификация базовой схемы из элементов XOR2, выполняющих роль элементов управляемой задержки, для которой возможно применение полного множества запросов. Показано, что задержка зависит не только от значения запроса, но и от конфигурации межсоединений структурных элементов схемы с конфигурируемым кольцевым генератором. Предлагается временная модель модифицированной ККО ФНФ, позволяющая аналитически доказать влияние межсоединений на частоту вырабатываемого сигнала, что экспериментально подтверждено с использованием FPGA Xilinx серии Zynq-7000 (Xilinx, США).

Проблема компенсации влияния температуры на ФНФ рассмотрена в статьях [26, 27]. Авторы проанализировали влияние температурных характеристик MOSFET¹⁰ на свойства RO-PUF без изменения исходной структуры схемы. Моделирование 55-нм процесса инструментами Cadence Virtuoso¹¹ выполненное методом Монте-Карло, показало, что применение в блоке генерации n -MOS-транзистора с высоким пороговым напряжением (NHVT¹²) приводит к тому, что изменение температуры оказывает наименьшее влияние на частоту генерации. В этом случае изменение частоты кольцевого генератора в диапазоне рабочих температур от 50 до 200 °C составляет 7.83%, что меньше, чем 14.35% у классического RO-PUF. Параллельно реализуются несколько кольцевых генераторов, измерение частоты путем подсчета фронтов нарастания остается тем же, но при запросе ФНФ выбирается произвольная пара генераторов, а ответ формируется как логическая функция результата сравнения двух полученных значений счетчиков (рис. 3).

В работах [28, 29] также продемонстрирована успешная реализация RO-PUF в FPGA: эксперименты

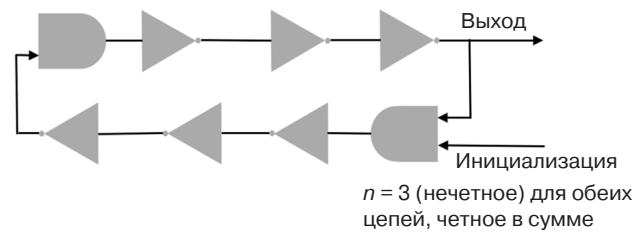


Рис. 4. Кольцевой генератор с переходным эффектом [30]

проводились на 15 программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) с 1024 контурами, получены значения $\mu_{inter} = 46.15\%$ и $\mu_{intra} = 0.48\%$. Авторы применили методику устранения состояний метастабильности, которая учитывает только наиболее стабильный бит отклика из 8 пар циклов генераторов. Источником вариации является случайная разность в задержке распространения сигнала по номинально идентичным путям. Авторы [29] предложили архитектуру Pseudo-LFSR PUF¹³, в которой структура LFSR реализована как замкнутая цепочка инверторов и XOR-элементов, формирующая единый контур, позволяющий надежно извлекать уникальные для каждого кристалла вариации задержек распространения сигнала.

В ФНФ на основе кольцевого генератора с переходным эффектом (transient effect ring oscillator physical unclonable function, TERO-PUF) анализируется изменение частоты и длительности сигнала в сигнальной линии и компонентах логических элементов в зависимости от типа их изготовления [30]. Кольцевой генератор с переходным эффектом состоит из двух последовательно соединенных бистабильных кольцевых генераторных цепей, как показано на рис. 4.

Кольцевой генератор с переходным эффектом формируется с четным числом инверторов, поэтому выходной сигнал ячейки переходит в стабильное состояние (аналогично бистабильному кольцу или ячейке памяти bus keeper), но не раньше, чем стабилизируются некоторые временные (переходные) колебания цепи. Подсчитывается количество колебаний, которые происходят в каждой ячейке TERO перед переходом в устойчивое состояние, при этом значения для нескольких ячеек объединяются для формирования характерного отклика для TERO-PUF. Здесь запрос заключается в номере или местоположении ячейки TERO (если существует несколько таких ячеек), а ответной реакцией являются временные колебания, возникающие при остановке системы.

⁸ Fully depleted silicon-on-insulator – полностью обедненный кремний на изоляторе.

⁹ Synopsys Electronic Design Automation Solutions. <https://www.synopsys.com/silicon-design.html>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

¹⁰ Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor – полевой транзистор с изолированным затвором.

¹¹ <https://cadence-ds.ru/virtuoso/>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

¹² N-type high voltage transistor – транзистор n -типа с повышенным пороговым напряжением.

¹³ Pseudo-feedback linear shift register PUF – ФНФ на основе псевдо-регистра сдвига с линейной обратной связью.

Ячейки TERO должны быть спроектированы и реализованы с симметричной структурой, которая требует специального выбора используемых элементов управления и задержек всех соединений. Внедрение таких компонентов в ПЛИС является специфической задачей, поскольку структура ПЛИС не позволяет разработчикам автоматически выбирать соединения между элементами. Задавая ограничения вручную и используя специфические особенности целевого семейства ПЛИС, можно добиться требуемой симметрии. В работе [30] описывается конструкция TERO-PUF для двух различных технологий FPGA (45-нм Xilinx Spartan 6¹⁴ и 28-нм Altera Cyclone V¹⁵). Статистическая обработка TERO-PUF с помощью двух целевых ПЛИС привела к тому, что уникальность Spartan 6 составила 48.46%, а Cyclone V – 47.62%. Результат по устойчивости составляет 2.63% при использовании Spartan 6 и 1.8% при использовании Cyclone V. Эти результаты близки к результатам, полученным в нескольких работах, где используется кольцевой генератор RO-PUF, который считается лучшим кандидатом для реализации PUF на ПЛИС. Отмечается, что TERO-PUF менее чувствителен к атакам на основе измерений побочных каналов, чем RO-PUF. Кроме того, в отличие от RO-PUF, TERO-PUF способен генерировать несколько битов для каждого запроса (от одного до трех). Авторы показали, что TERO-PUF обеспечивает от 0.85 до 1 бита энтропии на бит ответа. Эта работа демонстрирует, что TERO-PUF является перспективной альтернативой RO-PUF для реализации PUF на ПЛИС.

ФНФ с бистабильным кольцевым генератором (bistable ring physical unclonable function, BR-PUF) [22] имеет конструкцию, аналогичную кольцевому генератору PUF, но сохраняет стабильное состояние в течение определенного времени. Подобно ФНФ на основе кольцевого генератора, устройство состоит из цепочки вентилях NOT (или инвертора), однако в этой реализации имеется четное число вентилях, образующих бистабильную систему вместо колебательной (рис. 5).

При перезагрузке такая система через определенное время переходит в одно из стабильных состояний, определяемых уникальными технологическими вариациями при изготовлении кольца. Кольцо может иметь множество различных конфигураций, каждая из которых независимо стремится к предпочтительному состоянию. Это предпочтительное

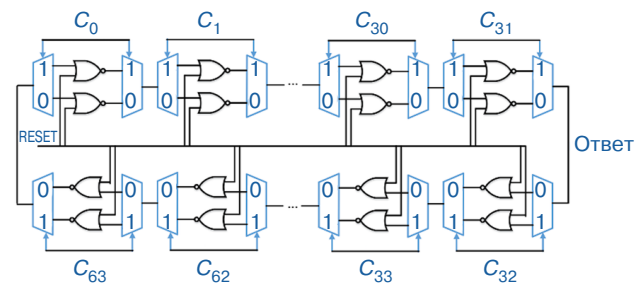


Рис. 5. Бистабильная кольцевая ФНФ.
 $C_0, C_1, C_{30}, C_{31}, C_{63}, C_{62}, C_{33}, C_{32}$ – запросы (challenges)

состояние действует как ответ, а конфигурация или бистабильное кольцо, в частности, определяется запросом (в данном случае – сигналом сброса) ФНФ.

Как впервые показано в оригинальной работе [22], где была предложена архитектура BR-PUF, число топологически различных колец составляет 2^n , что позволяет отнести данный примитив к классу «сильных» ФНФ, при этом естественный разброс технологических параметров обеспечивает хорошую межкристальную уникальность и широкий распределенный спектр времен сходимости кольца. В экспериментах на ПЛИС BR-PUF демонстрирует близкую к идеалу уникальность (~50%) и надежность порядка 97%, при этом длительные «хвосты» распределения времени стабилизации позволяют отбраковывать медленные либо нестабильные CRP, что повышает повторяемость. В то же время обнаружено, что одиночное кольцо поддается машинному моделированию: линейный алгоритм, обученный на миллионе пар «запрос – ответ», предсказывает ответы 64-, 128- и 256-стадийных экземпляров с ошибкой меньше 5%. Повысить устойчивость удастся простым параллельным XOR-объединением более 4 независимых колец [31].

Дальнейшее усиление этой архитектуры предложено в гибридной схеме Chaotic-BR-PUF: выход базового BR-кольца подвергается обфускации через нелинейное логистическое отображение, за счет чего эффективность атак падает до уровня случайного угадывания (50–60%) при сравнимых ресурсах ПЛИС [32].

Актуальной тенденцией является переход к многозначной логике: тернарная BR-PUF на CNTFET¹⁶-транзисторах формирует троичные ответы, экспоненциально расширяя пространство CRP и повышая энтропию без существенного роста аппаратных затрат. Моделирование на 32-нм библиотеке стандартных элементов показало улучшение непредсказуемости и стойкости к атакам на основе

¹⁶ Carbon nanotube field-effect transistor – транзистор на основе углеродных нанотрубок.

машинного обучения по сравнению с бинарным прототипом, а высокая температурная устойчивость CNTFET делает такой подход перспективным для IoT¹⁷-устройств [33].

ФНФ типа «арбитр» (A-PUF¹⁸)

Принцип работы ФНФ этого типа основан на сравнении времен прохождения двух сигналов, распространяющихся по теоретически симметричным траекториям. Модуль A-PUF состоит из нескольких ячеек, соединяющих источник сигнала с компонентом-арбитром (рис. 6).

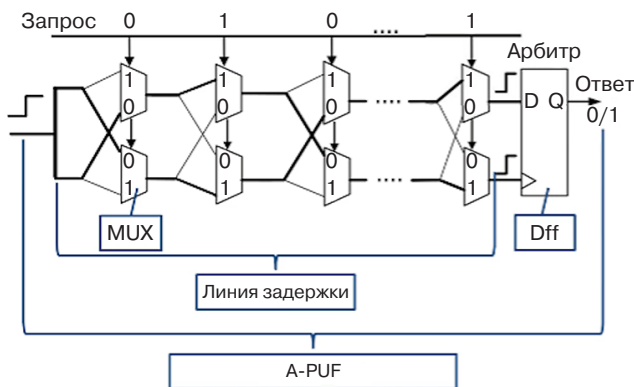


Рис. 6. Пример реализации ФНФ типа «арбитр». D – вход; Q – выход; Dff – D-триггер

Каждая ячейка имеет переключатель, который может направлять оба сигнала через другие сигнальные линии. Компонент-арбитр выдает двоичный выходной сигнал, значение которого зависит от того, какой из двух входных сигналов, отделенных от источника сигнала, достигает компонента первым. Из-за случайных изменений в проводнике и переключающих элементах, по которым проходит сигнал, скорость обоих сигналов будет варьироваться относительно друг друга. Таким образом запрос строится на основе характера включения/выключения маршрутизирующих коммутаторов (и кратности номера/положения арбитра в этих системах), а ответ формируется в зависимости от более быстрого пути после этого переключения.

Важно отметить, что в случае нарушения времени установки/удержания (setup/hold) возможна нежелательная ситуация метастабильности в арбитрах и результат его работы не будет зависеть от результата сравнения времен прохождения сигналов, а будет определяться случайным шумом в откликах (см., например, [8]).

Преимуществом ФНФ этого типа является простота реализации и малая занимаемая площадь:

одна n -ступенчатая A-PUF – это $2n$ мультиплексоров и один триггер-арбитр. При $n = 64$ схема занимает считанные сотни вентилях. Соответствующее устройство легко масштабируется на кремнии, т.к. разброс задержек, достаточный для генерации случайных различий, сохраняется с уменьшением норм техпроцесса. Практические реализации A-PUF демонстрируют уникальность, близкую к теоретически оптимальному значению 50%, особенно – при усложненных вариантах конструкции. Анализ публикаций, посвященных A-PUF, показывает множество вариаций их исполнения. В обзоре [3] кроме основной структуры A-PUF даны краткие описания модификаций этой архитектуры, в частности, двухканальных и многоканальных с элементами XOR, схем на основе мультиплексоров, комбинаций с RO-PUF и других. Уязвимость обычных функций A-PUF к атакам на основе моделирования на основе машинного обучения значительно ограничивает их применимость в безопасных средах с ограниченными ресурсами.

Архитектура ФНФ типа «арбитр» с улучшенными характеристиками представлена в работах [34–37]. Один из примеров реализации, в котором несколько независимых модулей объединяются функцией XOR для формирования единого ответа, приведен на рис. 7 [28].

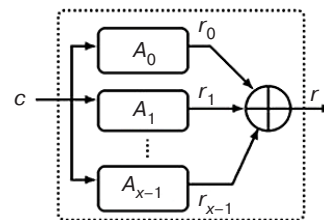


Рис. 7. Модификация A-PUF с объединением ответов функцией XOR. c – запрос; A_0, \dots, A_{x-1} – экземпляры A-PUF; r_0, \dots, r_{x-1} – ответы экземпляров A-PUF; r – ответ XOR A-PUF

В другой архитектуре¹⁹ модуль на основе оперативной памяти (FF-MB-A-PUF²⁰) объединяет слабые модули ФНФ на основе энергозависимой памяти с нелинейной логикой обратной связи для повышения энтропии и усиления устойчивости к атакам моделирования. Для оценки предложенного решения разработана комплексная экспериментальная

¹⁹ Mishra A. *Enhancing the security scalability of Arbiter PUFs using memory-based weak PUFs*. Thesis. West Lafayette (IN): Purdue University; 2025. https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/enhancing_the_security_scalability_of_arbiter_pufs_using_memory-based_weak_pufs/28899152. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

²⁰ Memory-based feed-forward arbiter PUF – ФНФ типа «арбитр» с опережающей связью на основе памяти.

¹⁷ Internet of things – интернет вещей.

¹⁸ Arbiter PUF.

система, использующая до 50 млн пар «запрос – ответ» (CRP). Результаты экспериментов показали, что как количество, так и точное расположение контуров обратной связи критически влияют на устойчивость моделирования. Для сопоставления полученных результатов с аналогичными реализациями в этой работе были внедрены и настроены самые современные стратегии моделирования, включая глубокие нейронные сети (deep neural networks, DNNs) и стратегию эволюции адаптации ковариационной матрицы. Оптимизированная конфигурация FF-MB-A-PUF, включающая 63 цикла обратной связи, продемонстрировала высокую устойчивость к атакам на основе моделирования, повышенную случайность (49.23%) и улучшенную уникальность между устройствами (49.20%), что привело к сбалансированному распределению выходных данных и высокой энтропии. Эти результаты позволяют считать FF-MB-A-PUF масштабируемым, аппаратно-эффективным и безопасным примитивом, идеально подходящим для встраиваемых систем нового поколения и маломощных IoT-систем.

В работе [37] описаны типовые методы стабилизации A-PUF от шума, старения, колебаний напряжения и температуры, в частности, усреднение и маскировка нестабильных битов.

ФНФ на основе задержек тактовых сигналов (Clock PUF)

ФНФ на основе задержек тактовых сигналов Clock PUF [38] в синхронных схемах анализирует изменение скорости распространения сигнала от тактового генератора к различным участкам самой схемы, основываясь на различиях в изготовлении при его физической реализации. В современных проектах ИС эти эффекты расфазировки являются паразитными, и их стремятся устранить, однако вариации и искажения все равно возникают. В этом варианте ФНФ сравниваются различия в задержках парных сигналов в предположительно схожих схемах, чтобы однозначно охарактеризовать схему, аналогично A-PUF. Здесь запросом являются линии тактового сигнала, а ответом – задержка в каждой соответствующей линии.

В работе [39] предлагается симметричный облегченный вариант ФНФ на основе трехфазного D-триггера с повышенной уникальностью, реализованный в ИС с использованием стандартной 40-нм КМОП²¹-технологии. Результаты моделирования после компоновки кристалла предсказывают, что уникальность устройства составляет 0.4994, что

²¹ Комплементарная структура металл-оксид-полупроводник.

является самым высоким показателем среди всех рассмотренных архитектур. По сравнению с A-PUF устройство имеет на 73.3% меньшую потребляемую мощность, занимает на 93.6% меньшую площадь и потребляет на 95.7% меньше энергии на один бит. Аналогичные показатели при сравнении с RO-PUF составляют 98.3%, 96.9% и 99.9% соответственно. Кроме того, в отличие от других ФНФ на основе триггеров, предлагаемый вариант не требует блока постобработки для устранения напряжения смещения, что способствует экономии общей площади реализации и мощности системы. Для доказательства этой концепции выполнена реализация этого устройства на ПЛИС, а для сравнения производительности между рассмотренными архитектурами предложен новый коэффициент качества (figure of merit, FOM), учитывающий мощность, надежность, задержку, площадь кремния и уникальность. Отмечено, что предлагаемая архитектура обеспечивает самый высокий показатель FOM среди рассмотренных архитектур ФНФ.

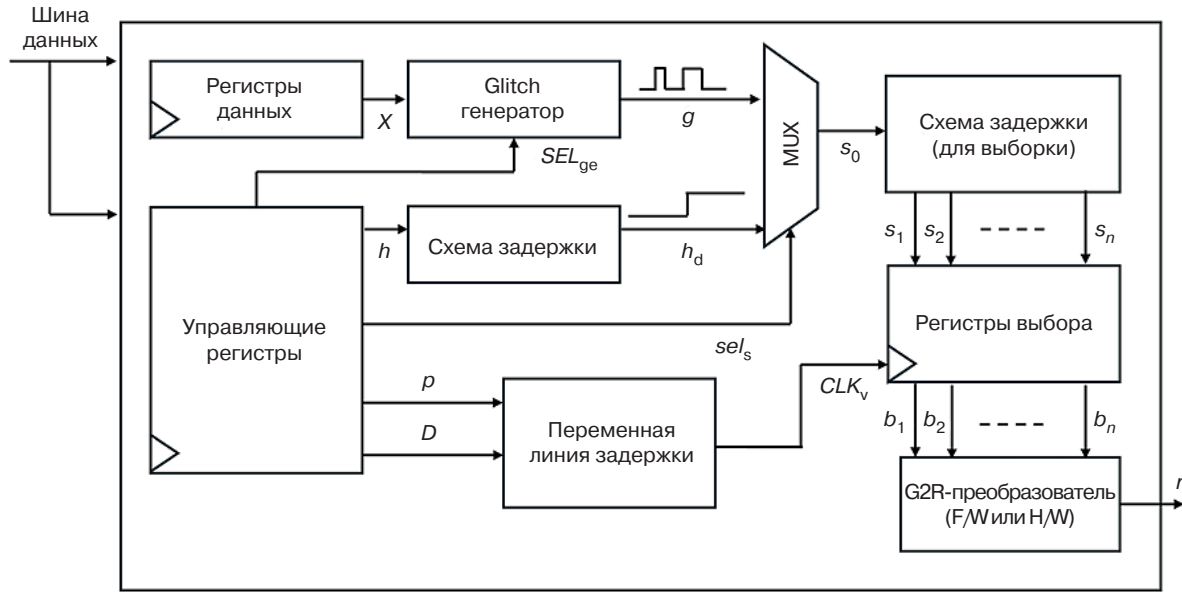
В исследовании [38] представлены новые технологии ФНФ, которые извлекают биты из попарных искажений между доменами тактовой сети ИС. Реализован алгоритм, который выбирает равноудаленные приемники и маршрутизирует обратную сеть, затем извлекает случайные биты для конкретного чипа. Оценка тактовых импульсов на основе SPICE²²-моделирования 45-нм КМОП-технологии подтверждает работоспособность, стабильность, уникальность, случайность и низкие накладные расходы данной реализации.

Вариант, основанный на анализе расфазировки тактового сигнала, рассмотрен также в работе [40]. Предлагается программный вариант ФНФ (S-PUF²³), которая вызывает ненормальную работу схемы кодирования видео, с применением тактового сигнала. Ключ отклика с характеристиками схемы генерируется путем использования зависимости отклика от пути синхронизации. В качестве несущей схемы ФНФ используется схема кодирования видео, которая является частью IP-ядра²⁴ микросхемы кодирования видео с открытым исходным кодом. На основе анализа временного тракта схемы кодирования выбирается сигнал запуска, переводящий схему в ненормальный режим работы. Генерируются случайные данные, которые подвергаются операциям кодирования

²² Simulation program with integrated circuit emphasis – симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. [Simulation program with IC emphasis is an open-source simulator of general-purpose electronic circuits.]

²³ Software PUF – программная ФНФ.

²⁴ IP-ядро (intellectual property) – готовые блоки для проектирования микросхем. [IP cores (intellectual property) are ready-made blocks for designing microchips.]



G2R: преобразование сбоя в бит ответа ФНФ

Рис. 8. Пример устройства с Glitch PUF [41].

X – входные данные, подаваемые на Glitch-генератор; SEL_{ge} – сигнал выбора выхода Glitch-генератора; g – выбранный выходной бит Glitch-генератора; s_0 – исходный Glitch-сигнал; s_1, \dots, s_n – сигналы после схемы задержки (точки выборки); h – калибровочный импульс; h_d – калибровочный импульс после схемы задержки; sel_s – входной сигнал выбора; p – триггерный сигнал; D – код управления временной задержкой; CLK_v – тактовый сигнал после переменной задержки; b_1, \dots, b_n – значения, считанные регистрами выбора и представляющие форму сбоя; G2R – Glitch-to-Response (устройство преобразования сбоя в ответ); F/W – firmware (прошивка); H/W – hardware (аппаратура); r – response (ответ)

и сжатия видео, которые затем маскируются с помощью кода Грея и операции исключения ложных битов. Результаты тестирования показывают, что предложенный вариант S-PUF проходит тест NIST с уникальностью 48.87% при коэффициенте автокорреляции этой реализации 0.0204 при 95%-й достоверности.

ФНФ на основе переходных процессов (Glitch PUF)

ФНФ на основе переходных процессов – это более сложные схемы, чем RO-PUF и A-PUF; они анализируют переходные характеристики сигналов, приводящие к сбоям работы устройства. Запросом для этой концепции ФНФ является сама схема, а ответом – конкретная реализация возникающих сбоях и эволюция их во времени (см. пример на рис. 8 [41, 42]).

В архитектуре Glitch PUF, описанной в [41], для формирования ФНФ используются сбои, которые возникают из-за изменения задержки между затворами транзисторов в схеме, влияющие на характеристики распространения импульса от каждого затвора. Описана процедура моделирования простой реализации такой схемы на этапе проектирования, результаты которой хорошо совпадают с данными, полученными при аппаратной реализации такой ФНФ в реальных микросхемах.

В [43] отмечается, что при аппаратной реализации Glitch PUF характерной проблемой является восприимчивость к шумам. Для снижения влияния шума предлагается модуль управления сбоями, который использует многоуровневую параллельную архитектуру для генерации многозарядной стабильной информационной энтропии. Разработана схема шумоподавления, которая фильтрует шум, используя эффект гистерезиса и механизм обратной связи с триггерами Шмитта и схема широтно-импульсного детектирования для извлечения выходных данных сигналов сбоях при переходных процессах. В 65-нм КМОП-технологии TSMC²⁵ реализована 128-битная схема такой Glitch PUF. Результаты экспериментов показывают, что случайность (intra-distance = 0.01) составляет 99.9%, а уникальность (inter-distance) – 50.03%, что означает, что предложенная конструкция может широко использоваться для обеспечения безопасности устройств интернета вещей.

В [44] указано, что производительность таких ФНФ незначительно колеблется из-за изменений окружающей среды, и для устранения этих колебаний требуются методы исправления ошибок и предлагается один из вариантов такого метода.

²⁵ Taiwan Semiconductor Manufacturing Company – производитель интегральных схем и полупроводниковых пластин. [The Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) is a manufacturer of ICs and semiconductor wafers.]

Для количественной демонстрации эффективности предложенного метода проводятся оценочные эксперименты с использованием FPGA.

РЕАЛИЗАЦИЯ ФНФ НА ОСНОВЕ ПАМЯТИ SRAM²⁶

ФНФ на основе статической памяти SRAM

Реализация ФНФ на основе статической памяти SRAM [45, 46] основана на том, что случайное распределение состояний ячеек памяти 6Т (рис. 9), определяющее их поведение при включении, непосредственно связано с условиями производства и допусками на технологически режимы их формирования. Случайное стартовое состояние ячеек SRAM служит «отпечатком» кристалла и может выступать либо непосредственно как ключ, либо как основа для генерации ответов на запросы. Таким образом, относительно стандартного массива SRAM она требует лишь контролируемого сброса/включения питания памяти или спецрежима и не вносит дополнительных энергозатрат в режиме покоя.

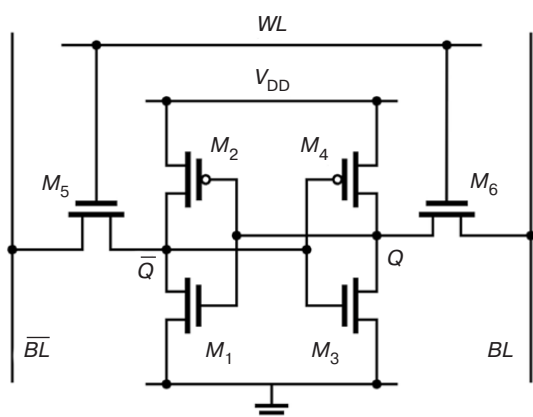


Рис. 9. Ячейка 6Т SRAM.

WL – word line (управляет двумя транзисторами доступа); V_{DD} – питание;
 M_1, \dots, M_6 – MOS-транзисторы;
 Q, \bar{Q} – комплементарные узлы хранения данных;
 BL, \bar{BL} – bit line (комплементарные битовые линии, используемые для записи и чтения данных)

Исследования показывают, что SRAM-PUF могут обеспечивать близкую к идеальному значению уникальность. Надежность же ограничена влиянием шумов и условий среды: без коррекции она составляет ~88–90% [16]. Для повышения надежности выхода применяют схемы усреднения (многократное считывание при включении)

и алгоритмы исправления ошибок (например, код Рида – Соломона или нечеткий экстрактор) [17].

SRAM-PUF успешно поддается масштабированию: реализации на техпроцессах вплоть до 7-нм показывают сохранение работоспособности [18, 47], хотя уменьшение размера транзисторов снижает абсолютные величины рассогласований, потенциально требуя более продвинутой обработки бит (например, отбраковки нестабильных ячеек) для поддержания надежности. Данные экспериментов с ФНФ на основе SRAM, основанные на изучении включения 8190 байт SRAM из разных блоков памяти на разных ПЛИС, показали, что среднее различие между двумя разными блоками составляет $\mu_{inter} = 49.97\%$, а среднее различие между несколькими измерениями в одном блоке составляет $\mu_{intra} = 3.57\%$ для фиксированных условий окружающей среды. Однако μ_{intra} увеличивается до 12% для больших отклонений температуры. Авторы оценивают энтропийное содержание состояний включения SRAM как 0.76 бит на ячейку SRAM.

Аналогичные результаты приведены в [46, 48], в которых изучено поведение SRAM при включении на двух разных платформах. Для 5120 блоков по 64 ячейки SRAM, измеренных на 8 коммерческих микросхемах SRAM, получено значение $\mu_{inter} = 43.16\%$ и $\mu_{intra} = 3.8\%$, а для 15 блоков по 64 ячейки SRAM из встроенной памяти на 3 микросхемах микроконтроллера авторы получили значение $\mu_{inter} = 49.34\%$ и $\mu_{intra} = 6.5\%$ соответственно.

Недостатком подобной реализации ФНФ на ПЛИС является то обстоятельство, что в наиболее распространенных ПЛИС все ячейки SRAM принудительно сбрасываются в ноль непосредственно после включения питания и, следовательно, теряется всякая случайность. Для устранения этого в ФНФ предложены схемы типа «бабочки» и схемы с защелками. Схема типа «бабочка» (butterfly), предложенная в [49], структурно состоит из двух перекрестно-связанных защелок (latch) с тактовым сигналом, установленным в единицу для симуляции комбинационного бистабильного элемента (рис. 10).

Сигнал excite устанавливает на выходах обоих элементов различные уровни сигнала (0/1), переводя ячейку в метастабильное состояние. При снятии сигнала схема переходит в стабильное случайное состояние, конкретное значение которого также определяется физическими причинами реализации триггеров и перекрестной связью, формируя бит ответа. Результаты измерений, приведенные в работе [50], получены на 64 схемах с ФНФ типа «бабочка» на 36 ПЛИС. Получены значения $\mu_{inter} = 50\%$ и $\mu_{intra} < 5\%$ при больших колебаниях температуры. Аналогично другим ФНФ, при использовании данного вида ФНФ применяются методы коррекции ошибок.

²⁶ Static random access memory – статическая память с произвольным доступом.

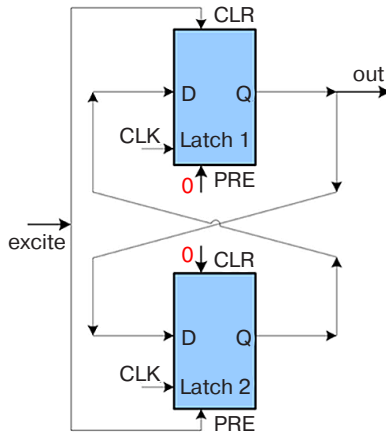
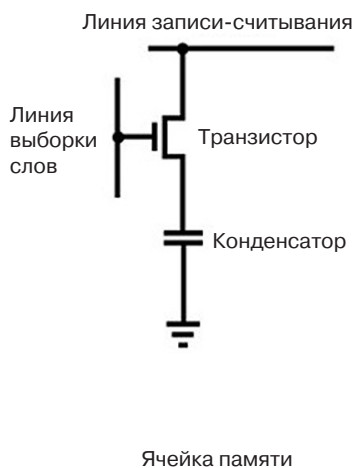


Рис. 10. ФНФ типа «бабочка» [49].

Latch 1/2 – защелка; excite – сигнал инициализации;
CLR (clear) – вход асинхронного сброса защелки;
PRE (preset) – вход асинхронной установки защелки;
CLK (clock) – вход тактового сигнала;
D – вход данных защелки; Q – выход защелки;
out – выход схемы

Другой вариант идентификации ИС предложен в работе [51]. Вместо перекрестного соединения двух инверторов или двух триггеров-защелок перекрестно соединены два NOR-вентили, образуя NOR-триггер. При подаче сигнала сброса этот триггер переходит в нестабильное состояние и возвращается в то или иное стабильное состояние в зависимости от внутреннего несоответствия между электронными компонентами. Эксперименты с 128 NOR-триггерами были проведены на 19 сверхбольших интегральных схемах, изготовленных при КМОП-технологии



Ячейка памяти

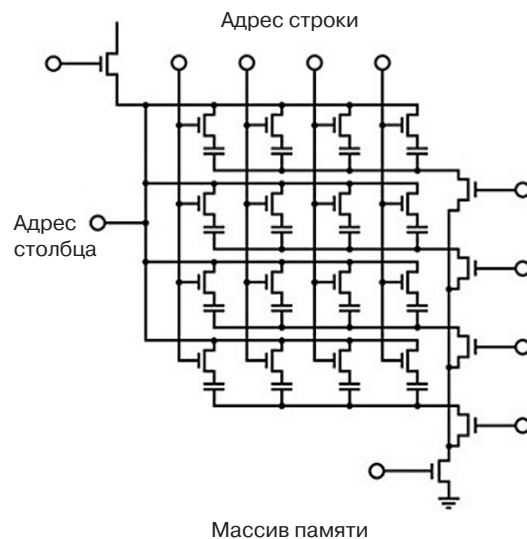
с топологическими нормами 0.130 мкм, получены значения $\mu_{inter} = 50.55\%$ и $\mu_{intra} = 3.04\%$.

ФНФ на основе динамической памяти DRAM²⁷

Другим видом ФНФ на основе энергозависимой памяти является DRAM-PUF, которая присутствует практически во всех современных вычислительных устройствах, включая ресурсно-ограниченные встраиваемые системы и IoT-платформы, что делает ее привлекательной основой для встроенных аппаратных примитивов безопасности. Большой объем ячеек обеспечивает значительный пул энтропии и потенциально широкое пространство пар «запрос – ответ», а доступ к DRAM возможен как на этапе загрузки, так и во время работы системы. Такие свойства особенно важны там, где невозможно или дорого применять классические отдельные защитные модули. Кроме того, по сравнению с SRAM, DRAM обычно потребляет меньше энергии при сопоставимой емкости.

Типичная ячейка на основе 1T1C²⁸ DRAM представляет собой комбинацию «транзистор – конденсатор» (рис. 11) и требует периодического регенерирования (refresh) из-за утечки заряда²⁹.

Вариации емкости, токов утечки и пороговых напряжений, возникающие при производстве, создают отличия между ячейками, которые можно использовать как уникальную сигнатуру. Утечки могут происходить как в пределах строки, так и в соседние строки/линии. Активное воздействие соседних строк друг на друга усиливает перетекание заряда



Массив памяти

Рис. 11. Память DRAM и ячейка 1T1C

²⁷ Dynamic random access memory – динамическая память с произвольным доступом.

²⁸ One-transistor, one-capacitor – ячейка оперативной памяти, состоящая из одного полевого транзистора и одного конденсатора. [One-transistor, one-capacitor is a RAM cell consisting of one field-effect transistor and one capacitor.]

²⁹ DRAM Scaling Challenges Grow. <https://semiengineering.com/dram-scaling-challenges-grow/>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.

и приводит к битовым инверсиям, повышающим энтропию. Также наблюдается явление переменного времени удержания (variable retention time, VRT): одна и та же ячейка может непредсказуемо переключаться между состояниями с высокой и низкой удерживающей способностью. Наконец, укороченные задержки операций чтения/записи (например, t_{RCD}^{30} , t_{RP}^{31}) приводят к тому, что часть ячеек не успевает корректно установиться, формируя характерный паттерн ошибок. Эти механизмы различной стабильности позволяют строить как воспроизводимые ФНФ (при отбраковке нестабильных битов и/или коррекции ошибок), так и высокоэнтропийные генераторы случайных чисел (TRNG) при работе в режимах, где результат максимально нестабилен.

Исследования DRAM-PUF традиционно группируют по используемому физическому эффекту: стартовые значения при включении питания, распад (retention/decay) при остановке refresh или отключении питания (Start-Up DRAM-PUF, Retention based DRAM-PUF), и нарушения таймингов (Latency-Based DRAM-PUF). Также изучаются более специфические эффекты, например, Rowhammer-PUF и комбинированные решения.

Работа Start-Up DRAM-PUF базируется на начальном распределении зарядов ячеек после подачи питания. В [52] исследовали устойчивость такой ФНФ к температуре (0–80 °C), питанию (4.5–5.5 В) и ускоренному старению, формируя 2048-битные ответы (16 × 128-битных ключей) и повышая надежность за счет алгоритма выбора ячеек с устойчивыми соседями. Последующий анализ показал, что понижение температуры и снижение напряжения питания сильнее ухудшают стабильность, чем повышение; эффект старения (negative bias temperature instability, NBTI) оказался умеренным.

Другие аналогичные работы использовали весь массив DRAM как «изображение» (преобразование в градации серого) с последующим извлечением признаков искусственной нейронной сетью для идентификации; достигнута точность классификации порядка ~98.8%, хотя классические метрики устойчивости ФНФ подробно не оценивались [53]. Также обсуждалась попытка улучшать случайность постобработкой LFSR (linear-feedback shift register).

Retention based DRAM-PUF использует вариации времени удержания заряда при отключении авто-refresh (или питания) и чтения массива через заданный интервал. Получаемый паттерн битовых инверсий уникален для сегмента памяти.

³⁰ Time row address to column address delay – задержка активации строки. [Time row address to column address delay is row activation delay.]

³¹ Row precharge time – время обновления строки. [Row precharge time is row refresh time.]

В работе [54] показано, что время ожидания ФНФ можно сократить до 20–60 с, если ответ формируется как карта местоположений битовых инверсий. Была показана уникальность не только на уровне микросхемы, но и между блоками памяти внутри одного DRAM-модуля. Надежность сохранялась при изменении температуры в пределах ± 10 °C (20–40 °C); также изучено влияние старения (85 °C, 48 ч).

В Latency-Based DRAM-PUF энтропия извлекается из различий в скоростях доступа к ячейкам. Для реализации ФНФ контроллер намеренно занижает тайминги (t_{RCD} , t_{RP} и т.д.), и отдельные ячейки начинают давать ошибки чтения/записи в характерных позициях. Такая архитектура сильно ускоряет работу ФНФ: сообщалось о времени порядка ~0.875 мс, что более чем в 10000 раз быстрее типичных retention DRAM PUF (около 10 с). Пример реализации [54] использует варьирование t_{RP}/t_{RCD} , запись известного шаблона, чтение с нарушенными таймингами и построение «энтропийных карт». После этого XNOR-фильтрация применяется для удаления нестабильных бит.

Эффект Rowhammer – намеренное многократное чередование обращений к тем строкам DRAM, к которым процессор намеренно обращается множество раз в очень коротком промежутке времени, вызывающее ускоренную утечку заряда в соседних строках и детерминированные битовые инверсии. В работе [28] этот феномен впервые применен для реализации ФНФ. Суть метода Rowhammer-PUF состоит в том, что из массива DRAM выделяются две ФНФ-строки памяти, которые заранее заполняют противоположными шаблонами: 0x55 и 0xAA. В определенный момент происходит отключение обновления (refresh) этих строк, которые начинают быстро разряжаться под действием активно работающих (активация + предзарядка) двух соседних Rowhammer-строк, формируя уникальный шаблон.

Комбинированные решения (например, объединение SRAM-PUF и DRAM-PUF) позволяют свести преимущества разных видов памяти и частично компенсировать недостатки каждой: показаны реализации с высокой энтропией, большим числом CRP и устойчивой аутентификацией в широком температурном диапазоне (20–60 °C).

Сравнение типов DRAM-PUF показывает, что в большинстве работ достигается значение inter-HD, близкое к идеальным 50%, тогда как надежность варьируется в зависимости от класса. Retention based DRAM-PUF оказываются более чувствительны к температуре/напряжению, Latency Based DRAM-PUF обычно более воспроизводимы при правильно выбранных порогах таймингов, Start-Up DRAM-PUF занимает промежуточное положение и требует алгоритмов выбора стабильных ячеек [55].

Большой объем DRAM потенциально обеспечивает широкое пространство CRP, однако на практике число пригодных стабильных бит резко сокращается после фильтрации по надежности и случайности, поэтому большинство DRAM-PUF в прикладных системах относят к «слабым» ФНФ (ограниченное число устойчивых CRP), подходящим прежде всего для генерации ключей и эпизодической аутентификации.

ФНФ на основе энергонезависимой памяти

ФНФ на основе энергонезависимой памяти (non-volatile memory, NVM) также используют случайные вариации характеристик ячеек памяти для формирования уникальных «отпечатков» микросхем. Ключевыми физическими эффектами, определяющими уникальность и стабильность ФНФ, построенных на энергонезависимой памяти, являются вариации материалов и токов утечки, а также стохастические процессы переключения.

В ReRAM-PUF³² [56] источником случайности служит стохастический процесс образования проводящих участков в диэлектрике: пороги переключения и сопротивление high/low состояния слегка разнятся от ячейки к ячейке из-за технологических допусков. В других вариантах ReRAM-PUF измеряется разброс сопротивлений в заранее сформированном массиве без его перезаписи [57].

Аналогично, в MRAM³³ уникальные различия обусловлены вариациями сопротивления магнитных туннельных переходов (magnetic tunnel junction, MTJ), возникающими при производстве [58]. В MRAM на вариативность влияет толщина барьера и магнитная анизотропия MTJ: малые разбросы вызывают различие сопротивлений ячеек в одном состоянии. Эти вариации, обусловленные технологией, очень стабильны во времени, что улучшает воспроизводимость ответа.

В PCM (phase-change memory, память на изменении фазы) за основу берутся различия в состояниях материала: при заводском изготовлении или после переключения в аморфное состояние каждая ячейка имеет слегка разный уровень проводимости из-за флуктуаций структуры, что позволяет считывать это состояние памяти как случайный шаблон [59]. Для достаточной воспроизводимости необходимо учитывать явление дрейфа сопротивления аморфного состояния со временем. В исследованиях показано, что грамотный выбор режима считывания (например, дифференциального) и калибровка позволяют минимизировать влияние дрейфа и получать стабильные биты [60].

Физические эффекты, создающие случайность – случайное зарождение проводящих каналов, вариации туннельного сопротивления, разброс фазового состояния обеспечивают высокую энтропию, а инженерные решения стремятся сгладить нестабильность этих эффектов для воспроизводимости. Таким образом, ReRAM-, MRAM- и PCM-PUF формируют бит ответа либо непосредственным считыванием неконтролируемого начального состояния ячеек, либо путем специального режима чтения/записи, выделяющего разброс характеристик ячеек. За последние годы предложено множество архитектур ФНФ на этих типах энергонезависимой памяти, нацеленных на улучшение их характеристик. Базовая схема – «слабая» ФНФ на основе массива памяти, когда ответы формируются из состояния большого числа ячеек (например, считывается N -битный стартовый вектор из неинициализированной памяти). Такой подход прост и экономичен, но дает ограниченное число пар «запрос – ответ» (фиксированный отпечаток) [61].

Для расширения пространства «запрос – ответ» применяют модифицированные архитектуры, переводящие их в класс «сильных» ФНФ: например, в ReRAM реализованы 2T2R- и 1T4R-ячейки с возможностью задавать разные пути чтения и сравнения сопротивлений, формируя экспоненциально большое число возможных ответов [59]. В одном из подходов, также предложенных в этой работе, массив ReRAM работает в режиме вычисления «in-memory», когда сочетание нескольких ячеек (через XOR или считывание по специальному шаблону) создает выход, нечувствительный к моделированию и устойчивый к атакам на основе машинного обучения.

С точки зрения схемотехники внимание также уделяется подавлению побочных каналов. В частности, симметричные структуры (например, зеркально переключаемые дифференциальные пары ячеек) устраняют систематический перекося и усложняют предсказание ответа атакующим [57]. Современные реализации включают также режим самоуничтожения: в ReRAM-PUF можно предусмотреть подачу повышенного напряжения, которое необратимо уничтожает часть ячеек при попытке вскрытия злоумышленником, тем самым уничтожая ключ [56].

Архитектуры энергонезависимых ФНФ охватывают спектр от компактных встроенных ячеек памяти, выдающих один зашифрованный ключ, до крупноразмерных перестраиваемых массивов, способных генерировать множество ответов и противостоять моделирующим атакам. ФНФ на энергонезависимой памяти способны обеспечивать показатели, близкие к идеальным. Уникальность в экспериментах с ReRAM, MRAM, PCM обычно составляет ~50%, Разница между повторными чтениями составляет менее 1–2%, а в ряде

³² Resistive random-access memory PUF.

³³ Magnetoresistive random-access memory – магниторезистивная память с произвольным доступом.

работ заявлено ~ 0.01 – 0.1% битовых ошибок без коррекции. Например, в MRAM-PUF на основе массива MTJ получены значения inter-HD $\sim 49.96\%$ и intra-HD $\sim 0.98\%$. Энтропия генерируемых ответов близка к максимальной: распределение 0/1 обычно около 50% (uniformity $\sim 50\%$), что подтверждается прохождением статистических тестов NIST на случайность для битовых последовательностей ФНФ. В обзорах отмечается, что современные ReRAM-PUF после отбраковки нестабильных бит обеспечивают информационную насыщенность ~ 1 бит энтропии на ячейку или очень близкую к этому.

Надежность ФНФ на базе энергонезависимой памяти характеризуется способностью сохранять стабильный ответ при различных помехах – изменениях температуры, напряжения питания, старении компонентов. Поскольку состояние энергонезависимой памяти физически закреплено (проводящие участки в ReRAM, магнитный вектор в MRAM, фазовая структура в PCM), такие ФНФ менее чувствительны к внешним воздействиям. Так, MRAM-PUF демонстрирует стабильность от -40 до 150 °C [59]. ReRAM-PUF при температурных циклах (например, от 25 до 125 °C) показывает лишь незначительное увеличение разброса сопротивлений; экспериментально подтверждено сохранение $>91\%$ бит без ошибок при 125 °C [56]. Вопрос старения также исследован: медленная деградация оксидных проводящих участков или туннельных барьеров за время службы устройства может повысить битовую ошибку, но заложенный запас по порогу и алгоритмы коррекции позволяют обеспечить многолетнюю стабильность.

Постобработка в схемах на основе памяти может уменьшать смещение и повышать статистические показатели, но добавляет накладные расходы и потенциальные уязвимости при неверном применении [55].

СВОДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОБОЗРЕВАЕМЫМ ФНФ

Ниже приведена сводная таблица характеристик некоторых ключевых вариантов ФНФ, рассмотренных в данной части цикла статей (таблица). Отражены работы, в которых приводятся оригинальные результаты после реализации одной или нескольких ФНФ. В качестве ключевых метрик выбраны inter-distance, intra-distance. В ряде публикаций они имеют названия уникальность (uniqueness) и надежность (reliability) соответственно.

Чувствительность к внешним условиям показывает, при каких вариациях напряжения/температуры проводились измерения характеристик и насколько они изменяются (в скобках указывается насколько изменяется intra-distance), если такие данные приводятся.

Столбец «Оценочная сложность реализации (высокая, средняя, низкая)» призван продемонстрировать относительные аппаратные затраты на реализацию того или иного вида ФНФ, а также техническую сложность (необходимость балансировки путей, подбора параметров элементов, изменения техпроцессов и т.д.).

Таблица. Сводные результаты по обозреваемым ФНФ

Тип ФНФ/работа	Год публикации	Характеристики ФНФ					
		Inter-distance	Intra-distance	Платформа	Inter-distance		Оценочная сложность реализации
					Температура	Напряжение	
RO [7]	2007	46.15%	0.48%	15 × Xilinx Virtex-4 LX25 FPGA	-20 – 120 °C	1.2 В $\pm 10\%$	средняя
Arbiter [7]	2007	23%	0.7%	ASIC TSMC 180-нм	20 – 70 °C (+4.8%), 20 – 120 °C (+9%)	$\pm 2\%$ (+3.7%), $\pm 33\%$ (+9%)	средняя
RO [10]	2009	47.8%	$\sim 0\%$	SPICE model 90-нм КМОП	-15 – 65 °C	0.2 – 1.0 В (+7% при 0.5 В)	средняя
SRAM PUF (FinFET ³⁴ 16-нм) [17]	2022	–	14%	NVIDIA Jetson, 16-нм LP FinFET	0 – 85 °C	–	низкая

³⁴ Fin field-effect transistor – транзистор с трехмерной структурой. [Fin field-effect transistor is a 3D-structured transistor.]

Таблица. Продолжение

Тип ФНФ/работа	Год публика- ции	Характеристики ФНФ					
		Inter-distance	Intra-distance	Платформа	Inter-distance		Оценочная сложность реализации
					Температура	Напряжение	
SRAM PUF (FinFET 14-нм) [17]	2022	–	10%	NXP LPC, 14-нм LP FinFET	0–85 °С	–	низкая
SRAM PUF (FinFET 7-нм) [17]	2022	–	11%	Xilinx Versal, 7-нм HP FinFET	0–85 °С	–	низкая
TERO [19]	2014	48.07%	1.73%	FPGA (Altera Cyclone II)	–	–	средняя
BR [22]	2011	49.8%	0.7%	FPGA (Xilinx Virtex-II Pro)	5–45 °С (+2.7%)	±10% (+2.2%)	средняя
CRO ³⁵ [23]	2024	45.5%	9.95%	ASIC 22-нм FDSOI	–40–70 °С	0.72–0.88 В	средняя
RO [26]	2025	–	0.38%	SPICE-model 55-нм КМОП	–50–200 °С (+9.38%)	–	средняя
Rowhammer [27]	2017	–	<5%	DDR3/4 DRAM	–40–60 °С	–	низкая
XOR Arbiter [28]	2022	48.69%	0.59%	FPGA (Xilinx Artix 7)	0–85 °С	0.95–1.05 В	средняя
Pseudo-LFSR [29]	2011	65.6%	1.8%	FPGA (Xilinx Virtex 5)	–	1 В	средняя
TERO [30]	2016	47.22%	2.36%	FPGA (Xilinx Spartan 6)	–15–65 °С	1.1–1.3 В	средняя
TERO [30]	2016	48.58%	2.66%	FPGA (Altera Cyclone V)	–15–65 °С	1.05–1.15 В	средняя
XOR BR [31]	2015	14.8%	0.8%	FPGA (Xilinx Spartan 6)	27–75 °С	–	средняя
BR [32]	2021	48.0%	–	FPGA (Xilinx Artix 7)	–	–	средняя
BR [33]	2024	66.26%	1.58%	SPICE-model CNTFET 32-нм КМОП	0–100 °С	0.8–1.0 В	средняя
Eye-Opening Arbiter ³⁶ [37]	2025	44.99%	3.49%	FPGA (Xilinx Zynq-7010)	–40–125 °С	0.81–0.99 В	средняя
Clock [38]	2013	50.11%	1.19%	SPICE-model 45-нм КМОП	–	–	средняя
Tri-state Flip-Flop ³⁷ [39]	2020	~49%	~2%	FPGA (Altera Cyclone)	–	–	низкая
Overclocking clock software ³⁸ [40]	2025	48.87%	–	SPICE model TSMC 65-нм КМОП	–25–125 °С	1.0–1.4 В	низкая

³⁵ Configurable ring oscillator PUF – конфигурируемая ФНФ на основе кольцевого осциллятора.

³⁶ ФНФ типа «арбитр» с фазовым окном. [Arbiter PUF with a phase window.]

³⁷ ФНФ на основе триггеров с высокоимпедансным выходом. [PUF based on high-impedance flip-flops.]

³⁸ Программная ФНФ на основе разгона тактового сигнала. [S-PUF based on overclocking.]

Таблица. Продолжение

Тип ФНФ/работа	Год публикации	Характеристики ФНФ					Оценочная сложность реализации
		Inter-distance	Intra-distance	Платформа	Inter-distance		
					Температура	Напряжение	
Glitch [41]	2010	~32%	1.3%	FPGA Xilinx XC3S400A–4FTG256C (16 boards)	100 °C (+5.3%)	–	средняя
Glitch PUF с триггером Шмитта [43]	2021	50.03%	–	ASIC TSMC 65-нм КМОП	–25–125 °C	0.8–1.4 В	средняя
SRAM [45]	2007	49.97%	3.57%	FPGA	–20–80 °C	–	низкая
Butterfly [49]	2007	~50%	~10%	FPGA (Xilinx Virtex-5)	–20–80 °C	–	средняя
MRAM [58]	2024	49.96%	0.98%	MRAM (STT ³⁹ -MRAM массив)	–25–100 °C	0.65–0.85 В	средняя
3D ReRAM [60]	2022	49.4%	0.014%	ReRAM (8-слойный 3D-массив)	0–80 °C (+1.93%)	1.65–2.2 В (+1.93%)	высокая
Dual-Mode ⁴⁰ ReRAM [61]	2025	~50%	~1%	ReRAM (1T1R ячейки + логика)	–	–	высокая

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФНФ на основе временных характеристик сигналов – это класс устройств, где для формирования откликов, обусловленных вариациями изготовления, используется анализ частоты, фазы и переходных процессов. Для получения устойчивого ответа таким решениям обычно требуются тщательно сбалансированная компоновка, калибровка и модули постобработки. Их преимуществом является практически неограниченное пространство пар «запрос – ответ», что делает их удобными кандидатами для протоколов аутентификации, однако они уязвимы к атакам на основе моделирования.

ФНФ на основе памяти формируют «отпечаток» из стартовых состояний и/или характеристик массивов SRAM/DRAM/NVM. Их сильная сторона – простая интеграция в уже имеющиеся на кристалле блоки и высокая воспроизводимость при умеренных накладных расходах. При этом пространство пар «запрос – ответ» обычно ограничено, что ориентирует их на задачи генерации ключей и идентификации устройства.

Для обоих классов важны меры стабилизации к условиям эксплуатации (температура, питание, старение) и использование вспомогательных данных, коррекции ошибок и/или модулей анализа.

Выбор конкретной ФНФ должен исходить из требований приложения и целевой платформы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов № FSFZ-2026-0003) и с применением оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075-15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State task for universities No. FSFZ-2026-0003) and using the equipment of the Center for Collective Use of RTU MIREA (agreement dated September 01, 2021, No. 075-15-2021-689, unique identification number 2296.61321X0010).

Вклад авторов

Е.Ф. Певцов – концепция исследования, разработка структуры обзора, написание текста статьи.

Т.А. Деменкова – концепция исследования, разработка структуры обзора, обобщение результатов.

Ю.А. Коротаев – анализ и систематизация литературы, написание текста статьи, обобщение результатов.

³⁹ Spin-torque-transfer – передача спинового момента. [Spin-torque-transfer.]

⁴⁰ Dual mode – двухканальный режим работы оперативной памяти. [Dual-channel RAM mode.]

А.С. Сигов – научное консультирование, научное редактирование статьи, утверждение финальной версии рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили опубликованную версию рукописи.

Authors' contributions

E.Ph. Pevtsov – study conceptualization, review outline and structure, manuscript writing.

T.A. Demenkova – study conceptualization, review outline and structure, synthesis of the results.

Yu.A. Korotaev – literature analysis and systematization, manuscript writing, synthesis of the results.

A.S. Sigov – scientific consulting, scientific editing, final approval of the manuscript.

All authors have read and approved the published version of the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Khalil K., Idris H., Idriss T., Bayoumi M. *Lightweight Hardware Security and Physically Unclonable Functions: Improving Security of Constrained IoT Devices*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025, 152 p.
2. McGrath T., Bagci I.E., Wang Z.M., Roedig U., Young R.J. A PUF taxonomy. *Appl. Phys. Rev.* 2019;6(1):011303. <https://doi.org/10.1063/1.5079407>
3. Zerrouki F., Ouchani S., Bouarfa H. A survey on silicon PUFs. *J. Syst. Archit.* 2022;127:102514. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2022.102514>
4. Alhamarnah R.A., Mahinderjit Singh M. Strengthening Internet of Things Security: Surveying Physical Unclonable Functions for Authentication, Communication Protocols, Challenges, and Applications. *Appl. Sci.* 2024;14(5):1700. <https://doi.org/10.3390/app14051700>
5. Tehranipoor M., Pundir N., Vashistha N., Farahmandi F. *Hardware Security Primitives*. Cham: Springer; 2023, 350 p.
6. Maes R., Verbauwhede I. Physically Unclonable Functions: A Study on the State of the Art and Future Research Directions. In: Sadeghi A.-R., Naccache D. (Eds.). *Towards Hardware-Intrinsic Security: Foundations and Practice*. Berlin: Springer; 2010. P. 3–37. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14452-3_1
7. Suh G.E., Devadas S. Physical Unclonable Functions for Device Authentication and Secret Key Generation. In: *Proceedings of the 44th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC 2007)*, San Diego, CA, USA, June 4–8, 2007. New York: ACM; 2007. P. 9–14. <https://doi.org/10.1145/1278480.1278484>
8. Лебедев В.Р., Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Малето М.И., Филимонов В.В. Метод исследования реализации физически неклонлируемых функций в информационных системах. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(1):28–36. URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1712>. Дата обращения 10.07.2025. / Accessed July 10, 2025. [Lebedev V.R., Pevtsov E.F., Demenkova T.A., Maletto M.I., Filimonov V.V. Method for studying the implementation of Physical Unclonable Function in information systems. *Int. J. Open Inf. Technol.* 2024;12(1):28–36 (in Russ.). Available from URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1712>. Accessed July 10, 2025.]
9. Gassend B., Clarke D., van Dijk M., Devadas S. Silicon physical random functions. In: *Proceedings of the 9th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS 2002)*, Washington, DC, USA, November 18–22, 2002. New York: ACM; 2002. P. 148–160. <https://doi.org/10.1145/586110.586132>
10. Vivekrajya V., Nazhandali L. Circuit-level techniques for reliable physically unclonable functions. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST 2009)*, San Francisco, CA, USA, July 27, 2009. Piscataway, NJ: IEEE; 2009. P. 30–35. <https://doi.org/10.1109/HST.2009.5225054>
11. Pappu R., Recht B., Taylor J., Gershenfeld N. Physical one-way functions. *Science*. 2002;297(5589):2026–2030. <https://doi.org/10.1126/science.1074376>
12. Anandakumar N.N., Hashmi M.S., Tehranipoor M. FPGA-based Physical Unclonable Functions: A comprehensive overview of theory and architectures. *Integration*. 2021;81:175–194. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2021.06.001>
13. Cao Y., Xu J., Wu J., Wu S., Huang Z., Zhang K. Advances in Physical Unclonable Functions Based on New Technologies: A Comprehensive Review. *Mathematics (Basel)*. 2024;12(1):77. <https://doi.org/10.3390/math12010077>
14. Vatalaro M., De Rose R., Lanuzza M., Crupi F. Weak physically unclonable functions in CMOS technology: A review. *Chips*. 2025;4(1):3. <https://doi.org/10.3390/chips4010003>
15. Sklavos N., Chaves R., Di Natale G., Regazzoni F. *Hardware Security and Trust: Design and Deployment of Integrated Circuits in a Threatened Environment*. Cham: Springer; 2017, 254 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44318-8>
16. Lata K., Cenkeramaddi L.R. FPGA-Based PUF Designs: A comprehensive review and comparative analysis. *Cryptography*. 2023;7(4):55. <https://doi.org/10.3390/cryptography7040055>
17. Masoumian S., Selimis G., Wang R., Schrijen G.-J., Hamdioui S., Taouil M. Reliability analysis of FinFET-based SRAM PUFs for 16 nm, 14 nm and 7 nm technology nodes. In: *Proceedings of the 2022 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE 2022)*, Antwerp, Belgium, March 14–23, 2022. Piscataway, NJ: IEEE; 2022. P. 1189–1192. <https://doi.org/10.23919/DATE54114.2022.9774735>
18. Eiroa S., Baturone I., Acosta A.J., Dávila J. Using physical unclonable functions for hardware authentication: A survey. In: *Proceedings of the 25th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS 2010)*, Lanzarote, Canary Islands, Spain, November 17–19, 2010. Lanzarote; 2010. URL: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/96029/1/Using%20Physical.pdf>

19. Bossuet L., Ngo X.T., Cherif Z., Fischer V. A PUF based on a transient effect ring oscillator and insensitive to locking phenomenon. *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.* 2014;2(1):30–36. <https://doi.org/10.1109/TETC.2013.2287182>
20. Brzuska C., Fischlin M., Schröder H., Katzenbeisser S. Physically uncloneable functions in the universal composition framework. In: Rogaway P. (Ed.). *Advances in Cryptology – CRYPTO 2011*, Santa Barbara, CA, USA, August 14–18, 2011. Book Series: Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer; 2011. V. 6841. P. 51–70. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22792-9_4
21. Tuyls P., Schrijen G.-J., Škorić B., van Geloven J., Verhaegh N., Wolters R. Read-proof hardware from protective coatings. In: Goubin L., Matsui M. (Eds.). *Cryptographic Hardware and Embedded Systems. CHES 2006*, Yokohama, Japan, October 10–13, 2006. Book Series: Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer; 2006. V. 4249. P. 369–383. https://doi.org/10.1007/11894063_29
22. Chen Q., Csaba G., Lugli P., Schlichtmann U., Rührmair U. The bistable ring PUF: a new architecture for strong physical unclonable functions. In: *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST 2011)*, San Diego, CA, USA, June 5–6, 2011. Piscataway, NJ: IEEE; 2011. P. 134–141. <https://doi.org/10.1109/HST.2011.5955011>
23. Abulibdeh E., Saleh H., Mohammad B., Al-Qutayri M., Veeran A. Area and power efficient implementation of configurable ring oscillator PUF. *TechRxiv Preprint*; April 2, 2024. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.171207533.30573247/v1>
24. Abulibdeh E., Saleh H., Mohammad B., Al-Qutayri M., Hussain A. Kernel-based response extraction approach for efficient configurable ring oscillator PUF. *Sci. Rep.* 2025;15:5938. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89769-5>
25. Иванюк А.А., Ярмолик В.Н. Конфигурируемый кольцевой осциллятор с управляемыми межсоединениями. *Безопасность информационных технологий.* 2024;31(2):121–133. <https://doi.org/10.26583/bit.2024.2.08> [Ivaniuk A.A., Yarmolik V.N. Configurable ring oscillator with controlled interconnections. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = IT Security (Russia)*. 2024;31(2):121–133 (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/bit.2024.2.08>]
26. Du H., Guo C., Cui S. Optimization design of the RO PUF temperature reliability based on MOSFET temperature characteristics. In: *The International Conference Optoelectronic Information and Optical Engineering (OIOE 2024)*, Wuhan, China, October 18–20, 2024. Proc. SPIE 13513; 2025. Art. 1351324. <https://doi.org/10.1117/12.3045630>
27. Schaller A., Xiong W., Anagnostopoulos N.A., Saleem M.U., Gabmeyer S., Katzenbeisser S., Szefer J. Intrinsic Rowhammer PUFs: Leveraging the Rowhammer effect for improved security. In: *Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST 2017)*, McLean, VA, USA, May 1–5, 2017. Piscataway, NJ: IEEE; 2017. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/HST.2017.7951729>
28. Anandakumar N.N., Hashmi M.S., Chaudhary M.A. Implementation of efficient XOR arbiter PUF on FPGA with enhanced uniqueness and security. *IEEE Access.* 2022;10:129832–129842. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3228635>
29. Hori Y., Kang H., Katashita T., Satoh A. Pseudo-LFSR PUF: A compact, efficient and reliable physical unclonable function. In: *Proceedings of the 2011 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig'11)*, Cancun, Mexico, November 30 – December 2, 2011. Cancun: IEEE; 2011. P. 223–228. <https://doi.org/10.1109/ReConFig.2011.72>
30. Marchand C., Bossuet L., Cherkaoui A. Enhanced TERO-PUF implementations and characterization on FPGAs. In: *Proceedings of the 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA 2016)*, Monterey, CA, USA, February 21–23, 2016. New York: ACM; 2016. P. 282. <https://doi.org/10.1145/2847263.2847298>
31. Xu X., Rührmair U., Holcomb D.E., Burleson W.P. Security evaluation and enhancement of bistable ring PUFs. In: Mangard S., Schaumont P. (Eds.). *Radio Frequency Identification. RFIDSec 2015*. Book Series: Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer; 2015. V. 9440. P. 3–16. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24837-0_1
32. Thirumoorthi M., Jovanovic M., Mirhassani M., Khalid M.A.S. Design and evaluation of a hybrid chaotic-bistable ring PUF. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.* 2021;29(11):1912–1921. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2021.3111588>
33. Sharifi F., Momeni H., Hosseini A. Ternary bistable ring PUF for high-secure applications. *J. Supercomput.* 2024;80:12663–12685. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-05935-y>
34. Rührmair U., van Dijk M. On the practical use of physical unclonable functions in oblivious transfer and bit commitment protocols. *J. Cryptogr. Eng.* 2013;3(1):17–28. <https://doi.org/10.1007/s13389-013-0052-8>
35. Rührmair U. Oblivious transfer based on physical unclonable functions. In: Acquisti A., Smith S.W., Sadeghi A.-R. (Eds.). *Trust and Trustworthy Computing. TRUST 2010*. Berlin: Springer; 2010. V. 6101. P. 430–440. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13869-0_31
36. Roy A., Roy D., Stănică P. On combining Arbiter based PUFs. *Cryptogr. Commun.* 2025;17(2):493–510. <https://doi.org/10.1007/s12095-024-00769-0>
37. Driemeyer B., Mandry H., Wiens D.-P., Becker J., Kauffman J.G., Ortmanns M. An eye-opening Arbiter PUF for fingerprint generation using auto-error detection for PVT-robust masking and bit stabilization achieving a BER of 2e-8 in 28 nm CMOS. In: *Proceedings of the 2025 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2025)*, San Francisco, CA, USA, February 16–20, 2025. Piscataway, NJ: IEEE; 2025. P. 300–302. <https://doi.org/10.1109/ISSCC49661.2025.10904785>
38. Yao Y., Kim M., Li J., Markov I., Koushanfar F. ClockPUF: physical unclonable functions based on clock networks. In: *Proceedings of the Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE 2013)*, Grenoble, France, March 18–22, 2013. Piscataway, NJ: IEEE; 2013. P. 422–427. <https://doi.org/10.7873/DATE.2013.095>
39. Khan S., Shah A.P., Chouhan S.S., Roy A., Roy D., Stănică P. Utilizing manufacturing variations to design a tri-state flip-flop PUF for IoT security applications. *Analog Integr. Circ. Sig. Process.* 2020;103:477–492. <https://doi.org/10.1007/s10470-020-01642-9>

40. Yuan T., Wang P., Zhang Y., Zhou Z. An overclocking clock software PUF circuit with no additional hardware resource overhead based on video coding circuit. *Integration*. 2025;101:102319. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2024.102319>
41. Suzuki D., Shimizu K. The Glitch PUF: a new Delay-PUF architecture exploiting glitch shapes. In: Mangard S., Standaert F.-X. (Eds.). *Cryptographic Hardware and Embedded Systems. CHES 2010*, August 17–20, 2010. Santa Barbara, CA, USA. Book Series: Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer; 2010. V. 6225. P. 366–382. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15031-9_25
42. Anderson J. A PUF design for secure FPGA-based embedded systems. In: *Proceedings of the 15th Asia South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2010)*, Taipei, Taiwan, January 18–21, 2010. Piscataway, NJ: IEEE; 2010. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2010.5419927>
43. Ni L., Wang P., Zhang Y., Chen J., Li L., Zhang H. A reliable multi-information entropy glitch PUF using Schmitt trigger sampling method for IoT security. In: *2021 IEEE 14th International Conference on ASIC (ASICON 2021)*, Kunming, China, October 26–29, 2021. Piscataway, NJ: IEEE; 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ASICON52560.2021.9620406>
44. Nozaki Y., Takemoto S., Yoshikawa M. Error correction method for lightweight cipher PRINCE-based physically unclonable function. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Information Technology and Computer Communications (ITCC 2024)*, Xi'an, China, July 5–7, 2024. New York: ACM; 2024. P. 38–42. <https://doi.org/10.1145/3704391.3704397>
45. Guajardo J., Kumar S.S., Schrijen G.-J., Tuyls P. FPGA intrinsic PUFs and their use for IP protection. In: Paillier P., Verbauwhede I. (Eds.). *Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2007*, Vienna, Austria, September 10–13, 2007. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer; 2007. V. 4727. P. 63–80. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74735-2_5
46. Holcomb D.E., Burleson W.P., Fu K. Initial SRAM state as a fingerprint and source of true random numbers for RFID tags. *Proceedings of the Conference on RFID Security*. 2007;7(2):01–012.
47. Gebali F., Mamun M. Review of physically unclonable functions (PUFs): Structures, models, and algorithms. *Front. Sens.* 2022;2:751748. <https://doi.org/10.3389/fsens.2021.751748>
48. Holcomb D.E., Burleson W.P., Fu K. Power-up SRAM state as an identifying fingerprint and source of true random numbers. *IEEE Trans. Comput.* 2009;58(9):1198–1210. <https://doi.org/10.1109/TC.2008.212>
49. Kumar S., Guajardo J., Maes R., Schrijen G.-J., Tuyls P. The butterfly PUF: protecting IP on every FPGA. In: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST 2008)*, Anaheim, CA, USA, June 3–4, 2008. Piscataway, NJ: IEEE; 2008. P. 67–70. <https://doi.org/10.1109/HST.2008.4559053>
50. Farha F., Ning H., Ali K., Chen L., Nugent C. SRAM-PUF-based entities authentication scheme for resource-constrained IoT devices. *IEEE Internet Things J.* 2021;8(7):5904–5913. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3032518>
51. Su Y., Holleman J., Otis B. A 1.6 $\mu\text{J}/\text{bit}$ stable chip-ID generating circuit using process variations. In: *Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2007)*, San Francisco, CA, USA, February 11–15, 2007. Piscataway, NJ: IEEE; 2007. P. 606–611. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2007.373466>
52. Tehranipoor F., Karimian N., Yan W., Chandy J.A. Investigation of DRAM PUFs reliability under device accelerated aging effects. In: *Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2017)*, Baltimore, MD, USA, May 28–31, 2017. Piscataway, NJ: IEEE; 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050629>
53. Yue M., Karimian N., Yan W., Anagnostopoulos N.A., Tehranipoor F. DRAM-based authentication using deep convolutional neural networks. *IEEE Consum. Electron. Mag.* 2021;10(4):8–17. <https://doi.org/10.1109/MCE.2020.3002528>
54. Sutar S., Raha A., Raghunathan V. D-PUF: an intrinsically reconfigurable DRAM PUF for device authentication in embedded systems. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Compilers, Architectures and Synthesis of Embedded Systems (CASES 2016)*, Pittsburgh, PA, USA, October 2–7, 2016. New York: ACM; 2016. P. 1–10. <https://doi.org/10.1145/2968455.2968519>
55. Chew Y.Y., Lim W.L., Tan J.L., Ooi C.Y. In-depth review and comparative analysis of DRAM-based PUFs. *IEEE Access.* 2025;13:79367–79384. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3566068>
56. Wilson T., Cambou B. Tamper-sensitive pre-formed ReRAM-based PUFs: Methods and experimental validation. *Front. Nanotechnol.* 2022;4:1055545. <https://doi.org/10.3389/fnano.2022.1055545>
57. Napoleon A., Sivamangai N.M., Sharon N., Naveen Kuma R. Review on resistive random access memory based physical unclonable function circuits for high security. *Procedia Environ. Sci. Eng. Manag.* 2023;10(1):41–52. URL: http://www.procedia-esem.eu/pdf/issues/2023/no1/5_Napoleon_22.pdf. Дата обращения 10.07.2025. / Accessed July 10, 2025.
58. Adel M.J., Rezayati M.H., Moaiyeri M.H., et al. A robust deep learning attack immune MRAM-based physical unclonable function. *Sci. Rep.* 2024;14:20649. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71730-7>
59. Go S.X., Wang Q., Lim K.G., Lee T.H., Bajalovic N., Loke D.K. Ultrafast near-ideal phase-change memristive physical unclonable functions driven by amorphous state variations. *Adv. Sci. (Weinh.)* 2022;9(36):e2204453. <https://doi.org/10.1002/adv.202204453>
60. Yang J., Lei D., Chen D., Li J., Jiang H., Luo Q., et al. Machine-learning-resistant 3D PUF with 8-layer stacking vertical RRAM and 0.014% bit error rate using in-cell stabilization scheme for IoT security applications. In: *2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, CA, USA, December 12–18, 2020. Piscataway, NJ: IEEE; 2020. P. 28.6.1–28.6.4. <https://doi.org/10.1109/IEDM13553.2020.9372107>
61. Li J., Cui Y., Gu C., Wang C., Liu W., Kvatinisky S. A highly reliable dual-mode RRAM PUF with key concealment scheme. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 2025. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2025.3536376>

Об авторах

Певцов Евгений Филиппович, к.т.н., директор структурного подразделения «Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pevtsov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602652601, ResearcherID M-2709-2016, SPIN-код РИНЦ 1410-2483, <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

Деменкова Татьяна Александровна, к.т.н., доцент, кафедра вычислительной техники, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: demenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 57192958412, ResearcherID AAB-3937-2020, SPIN-код РИНЦ 3424-7489, <https://orcid.org/0000-0003-3519-6683>

Коротаев Юрий Александрович, аспирант, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: korotaevyua@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 7428-6831, <https://orcid.org/0009-0000-3976-7872>

Сигов Александр Сергеевич, академик Российской академии наук, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, SPIN-код РИНЦ 2869-5663, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

About the Authors

Evgenii Ph. Pevtsov, Cand. Sci. (Eng.), Director of Center for the Design of Integrated Circuits, Nanoelectronics Devices and Microsystems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pevtsov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602652601, ResearcherID M-2709-2016, RSCI SPIN-code 1410-2483, <http://orcid.org/0000-0001-6264-1231>

Tatyana A. Demenkova, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: demenkova@mirea.ru. Scopus Author ID 57192958412, ResearcherID AAB-3937-2020, RSCI SPIN-code 3424-7489, <http://orcid.org/0000-0003-3519-6683>

Yuri A. Korotaev, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: korotaevyua@yandex.ru. RSCI SPIN-code 7428-683, <https://orcid.org/0009-0000-3976-7872>

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, RSCI SPIN-code 2869-5663, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.226.8

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-103-112>

EDN OEWULY



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование резонансного возбуждения терагерцевым излучением решеточной подсистемы сегнетоэлектрика в условиях неравновесного состояния

Н.Э. Шерстюк[®], К.А. Брехов, Е.Д. Мишина

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: nesherstuk@mail.ru

• Поступила: 28.03.2025 • Доработана: 21.10.2025 • Принята к опубликованию: 16.02.2026

Резюме

Цели. Поиск принципиально нового наиболее быстрого и наименее диссипативного способа управления ферроидным параметром порядка является актуальной и весьма амбициозной задачей фундаментальных и прикладных исследований в области разработки малодиссипативных и быстродействующих функциональных элементов информационных систем, оперирующих на терагерцевых (ТГц) частотах, для сетевых технологий 6G¹. Целью работы является исследование условий модуляции поляризации сегнетоэлектрика при помощи короткого ТГц-импульса, в т.ч. изучение влияния дополнительных факторов на эффективность ТГц-индуцированной динамики ферроидного параметра порядка.

Методы. Численное моделирование резонансного возбуждения ТГц-излучением решеточной подсистемы проводилось для сегнетоэлектрической пленки титаната бария-стронция $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ на основе системы уравнений, состоящей из уравнения Ландау – Халатникова и уравнения колебаний фононной моды, где в качестве вынуждающей силы выступает фонон-фононное взаимодействие. Новизна подхода заключается во взаимодействии ТГц-импульса с ранее когерентно возбужденной фононной модой, имеющей значительную амплитуду.

Результаты. Представлены временные зависимости поляризации, а также эффективной амплитуды колебаний инфракрасно-активной моды при варьировании параметров ТГц-поля и констант разложения термодинамического потенциала неравновесного состояния в виде ряда по степеням параметра порядка в разных режимах воздействия, включая изменение температуры и дополнительное воздействие внешнего электрического поля.

Выводы. Предложенный подход описывает переключение поляризации под действием ТГц-импульса при предварительном возбуждении когерентного фонона фемтосекундным оптическим импульсом. Наиболее важным параметром, определяющим пороговое воздействие ТГц-импульса на возбуждение фонона, является энергия (амплитуда) импульса. В области малых амплитуд увеличение температуры не приводит к ухудшению условий переключения.

¹ Sixth generation – шестое поколение мобильной связи. [Sixth generation of mobile communications technology].

Ключевые слова: терагерцевое излучение, сегнетоэлектрики, поляризация, резонансное возбуждение, фононные моды

Для цитирования: Шерстюк Н.Э., Брехов К.А., Мишина Е.Д. Моделирование резонансного возбуждения терагерцевым излучением решеточной подсистемы сегнетоэлектрика в условиях неравновесного состояния. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):103–112. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-103-112>, <https://www.elibrary.ru/OEWULY>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Modeling of resonant excitation of ferroelectric lattice subsystem by terahertz radiation under nonequilibrium conditions

Natalia E. Sherstyuk[@], Kirill A. Brekhov, Elena D. Mishina

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: nesherstuk@mail.ru

• Submitted: 28.03.2025 • Revised: 21.10.2025 • Accepted: 16.02.2026

Abstract

Objectives. The search for a fundamentally new, fast, and least dissipative method for controlling the ferroic order parameter is a pressing and ambitious task of basic and applied research on the development of low-dissipation and high-speed functional elements of information systems operating at terahertz (THz) frequencies for 6G² network technologies. The aim of the work is to study the conditions for modulating ferroelectric polarization using a short THz pulse. This will also include the influence of additional factors on the efficiency of the THz-induced dynamics of the ferroic order parameter, such as stationary heating and the application of an additional electric field to the ferroelectric.

Methods. The numerical simulation of resonant excitation of the lattice subsystem by THz radiation was performed for a Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃ ferroelectric film using the Landau–Khalatnikov equation system, and the equation of phonon mode oscillations with the phonon–phonon interaction as a driving force. The novelty of the proposed approach lies in the interaction of the THz pulse with a previously coherently excited phonon mode with a significant amplitude.

Results. The time dependencies were presented for the polarization and the effective amplitude of infrared-active mode oscillations with varying THz field parameters. The results also included constants of expansion of the thermodynamic potential of the nonequilibrium state in powers of order parameter in various exposure modes, including temperature changes and the application of an additional external electric field.

Conclusions. The approach proposed herein describes polarization switching under the action of a THz pulse with preliminary excitation of a coherent phonon by a femtosecond optical pulse. The most important parameter when determining the threshold effect of a THz pulse on phonon excitation is pulse energy (amplitude). In the region of small amplitudes, an increase in temperature does not exacerbate switching conditions.

Keywords: terahertz radiation, ferroelectrics, polarization, resonant excitation, phonon modes

² Sixth generation of mobile communications technology.

For citation: Sherstyuk N.E., Brekhov K.A., Mishina E.D. Modeling of resonant excitation of ferroelectric lattice subsystem by terahertz radiation under nonequilibrium conditions. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):103–112. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-103-112>, <https://www.elibrary.ru/OEWULY>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка устройств терагерцевого (ТГц) диапазона является одним из наиболее актуальных направлений в области современной микро(нано)электроники и фотоники. Помимо получивших уже широкое распространение методов ТГц-спектроскопии и визуализации для диагностики материалов, в настоящее время все большее внимание исследователи уделяют системам и функциональным устройствам ТГц-диапазона, предназначенным для управления и контроля ТГц-сигналами [1, 2]. Показано, что использование ТГц-диапазона (0.1–10 ТГц) для передачи данных обеспечивает высокую пропускную способность и плотность данных и рассматривается как наиболее перспективный подход для сетевых технологий 6G³ [3, 4].

Одной из ключевых проблем в данном направлении является поиск новых материалов, обеспечивающих эффективный оптический и/или электрический контроль генерации, детектирования и распространения ТГц-излучения. Сегнетоэлектрические материалы играют важную роль в исследованиях функциональных устройств, работающих в ТГц-диапазоне, из-за их времени отклика, малых диэлектрических потерь и перестраиваемости. Продемонстрированная в ряде работ возможность оптической манипуляции диэлектрической проницаемостью тонких сегнетоэлектрических пленок позволяет ожидать значительную глубину модуляции в ТГц-области и имеет большое значение для разработки полностью оптических и гибридных чипов.

В связи с этим актуальной является задача о возбуждении мягкой моды сегнетоэлектрика и переключении за счет такого возбуждения поляризации сегнетоэлектрика коротким ТГц-импульсом. В первых работах по ТГц-возбуждению относительно малыми полями (до 100 кВ/см) сообщалось о когерентном возбуждении полярных мод малой амплитуды: в кристаллах титаната стронция SrTiO₃ [5], сегнетоэлектриках-релаксорах [6], органическом сегнетоэлектрике [7]. Достигнутый за последние годы прогресс в разработке ТГц-источников, позволяющих генерировать импульсы (в т.ч. одиночные) большой

мощности, позволил наблюдать не только возбуждение когерентных фононов, но и сверхбыстрое, за субпикосекундные времена, переключение поляризации. Такое переключение регистрировалось либо напрямую методами рентгеновской дифракции [8–11], либо оптическими методами [12–14]. В последних работах обсуждалось также, что воздействие сверхкороткого электромагнитного импульса может приводить к двум типам переключения поляризации: перманентному, при котором индуцированное внешним воздействием переключение в противоположное поляризационное состояние сохраняется после окончания воздействия, и динамическому, в результате которого после воздействия ТГц-импульса поляризационное состояние может несколько раз переключиться в противоположное и обратно, и в конце концов система релаксирует к исходному состоянию.

Если для прямого воздействия на мягкую моду задача в некотором смысле решена, то влияние фонон-фононного взаимодействия на рассматриваемые процессы активно обсуждается до настоящего времени. В ряде работ предложен подход, основанный на уравнении Ландау – Халатникова [15], в котором воздействие на мягкую моду обсуждается в рамках модели связи рамановской и инфракрасно-активной (ИК) моды [16, 17]. В работах [13, 18] для описания процессов сверхбыстрого переключения поляризации предложен подход, основанный на нелинейной связи между низкочастотной полностью симметричной фононной модой A_1 , которая включает движение катионов и анионов материала таким образом, что это изменяет электрическую поляризацию, и наиболее высокочастотной ИК-активной фононной модой. При этом процессы переключения обсуждаются в терминах смещения ионов кристаллической решетки, описываемых обобщенными координатами Q_P и Q_{IR} , а связь между модами пропорциональна произведению обобщенной координаты полярной моды на квадрат ИК-моды. Это позволяет предположить различные условия переключения для векторов поляризации, направленных до начала воздействия в противоположных направлениях. Однако в работе [19] указано на ошибочность такого представления в силу симметрии преобразования и предлагается рассматривать в качестве основного члена произведения квадратов обобщенных координат полярной и ИК-мод. При этом указано, что

³ Sixth generation – шестое поколение мобильной связи. [Sixth generation of mobile communications technology].

произведения первых степеней обобщенных координат полярной и ИК-мод также удовлетворяют условиям симметрии, однако, рассмотренные без квадратичного члена, они не объясняют экспериментальные зависимости, приведенные в работе [13].

Необходимо отметить, что упомянутые выше модели, описывающие модуляцию поляризации и ее перманентное переключение, дают нестабильные решения: при небольших изменениях любого параметра свойства системы меняются скачком, что описывается уравнением Ландау – Халатникова с учетом сильной нелинейности поляризации вблизи резонанса [20]. В связи с этим важно учитывать возможные дополнительные воздействия на сегнетоэлектрик: нагрев, электрическое поле, оптическую подсветку. Комплексное решение данной задачи, как представляется, будет возможным только при выявлении физических механизмов, способных обеспечить практическое достижение переключения поляризации при помощи электромагнитного импульса.

В настоящей работе рассматриваются процессы модуляции поляризации сегнетоэлектрика коротким ТГц-импульсом на примере титаната бария-стронция $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (BST). Представлено расширение теоретической модели [19] с использованием двух членов в разложении энергии фонон-фононного взаимодействия: сумма линейных и квадратичных членов по произведению обобщенных координат полярной и ИК-мод. Моделирование проводилось с учетом условий экспериментального наблюдения ТГц-индуцированной модуляции сегнетоэлектрической поляризации в геометрии оптической накачки – ТГц-зондирования.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Переключение поляризации под действием ТГц-импульса при предварительном возбуждении когерентного фонона фемтосекундным оптическим импульсом

Рассмотрим систему, состоящую из невозбужденных сегнетоэлектрических ячеек, обладающих двухминимумным потенциалом, и фонона, возбужденного оптическим излучением, в поле ТГц-импульса. В этом случае энергетически более выгодным является возбуждение мягкой моды за счет фонон-фононного взаимодействия. Поскольку поляризация сегнетоэлектрика определяется асимметричным смещением катионов и анионов в кристаллической структуре, при возбуждении когерентного оптического фонона увеличивается эффективная амплитуда колебаний соответствующей группы атомов. Именно эта амплитуда, возрастающая по мере увеличения интенсивности оптического импульса,

будет служить начальным условием в рассматриваемой задаче.

Будем считать также, что с некоторой задержкой на сегнетоэлектрик падает ТГц-импульс, находящийся в резонансе с мягкой модой сегнетоэлектрика. Таким образом, мягкая мода будет возбуждаться и напрямую ТГц-импульсом, и за счет фонон-фононного взаимодействия оптическим фононом, который, в свою очередь, был возбужден фемтосекундной оптической накачкой. Вопрос, на который ищется ответ: будет ли такое воздействие эффективнее, чем прямое воздействие единственно ТГц-импульсом, и приведет ли это с большей вероятностью к переключению поляризации сегнетоэлектрика?

Так как BST – многоосный сегнетоэлектрик, его параметр порядка является многокомпонентным. В соответствии с подходом, приведенным в работах [13, 18, 19], ограничимся рассмотрением изменения состояния поляризации, вызванного селективным возбуждением колебаний решетки электрическим полем короткого ТГц-импульса вдоль направления, заданного плоскостью поляризации ТГц-излучения. В начальном состоянии считаем поляризацию, обусловленную суммарным дипольным моментом рассматриваемого множества ячеек в области воздействия ТГц-импульса, равной нулю.

С учетом [19], запишем энергию взаимодействия полярной и ИК-мод в единице объема в виде:

$$W(\xi_P, \xi_{IR}) = j\xi_P\xi_{IR} + h\xi_P^2\xi_{IR}^2,$$

где ξ_P и ξ_{IR} – эффективные координаты полярной и высокочастотной фононной (ИК) мод, соответственно; j и h – коэффициенты разложения $W(\xi_P, \xi_{IR})$ по степеням координат.

В соответствии с [19] коэффициент связи между полярной и ИК-модами существенно зависит от эффективной координаты полярной моды. Для того чтобы потенциальная энергия, описывающая фонон-фононное взаимодействие, была физически значимой, смещение полярного иона относительно равновесного положения должно быть малым. В рамках рассматриваемой модели величина модуляции эффективных координат не превышает 5% от параметра решетки, однако для случая динамического переключения поляризации, т.е. перескока полярного иона из одной ямы в другую, данное ограничение накладывается на модуляцию эффективной координаты ξ_P после такого перескока.

Учитывая определение диэлектрической поляризации $P = \frac{q_P \xi_P}{V}$ (q_P – эффективный заряд, смещение которого определяет возбуждение полярной моды, V – объем ячейки), выражая полярную координату ξ_P через поляризацию и введя обозна-

чения $C_1 = j \frac{V}{q_P}$, $C_2 = h \left(\frac{V}{q_P} \right)^2$, запишем энергию взаимодействия в виде:

$$W(P, \xi_{\text{IR}}) = C_1 P \xi_{\text{IR}} + C_2 P^2 \xi_{\text{IR}}^2. \quad (1)$$

Уравнение колебаний эффективной координаты ИК-фононной моды представляет собой уравнение ангармонического осциллятора:

$$\ddot{\xi}_{\text{IR}} = 2\gamma_{\text{IR}} \dot{\xi}_{\text{IR}} + \omega_{\text{IR}}^2 \xi_{\text{IR}} = -\frac{V}{m_{\text{IR}}} F_{\text{IR}}, \quad (2)$$

где γ_{IR} – коэффициент затухания, а правая часть определяется производной свободной энергии (1) по соответствующей координате:

$$F_{\text{IR}} = -\frac{\partial W(\xi_{\text{P}}, \xi_{\text{IR}})}{\partial \xi_{\text{IR}}}.$$

В соответствии с уравнением Ландау – Халатникова, уравнение, описывающее динамику параметра порядка в условиях затухания, принимает вид [20]:

$$\begin{aligned} \ddot{P} + \gamma \dot{P} + \frac{1}{\mu} (a_1 P + a_{11} P^3 + a_{111} P^5 + a_{1111} P^7) = \\ = \frac{1}{\mu} F_{\text{P}} + \frac{1}{\mu} E(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $F_{\text{P}} = -\frac{\partial W(\xi_{\text{P}}, \xi_{\text{IR}})}{\partial \xi_{\text{P}}}$, $\mu = \frac{m_{\text{P}} V}{q_{\text{P}}^2}$, а $E(t) = E_{\text{ext}}(t) + E_1(t)$ – электрическое поле, действующее на сегнетоэлектрик, равное сумме внешнего $E_{\text{ext}}(t)$ и деполяризующего $E_1(t)$ полей.

Внешнее поле представляет собой зависящую от времени электрическую компоненту пикосекундного

ТГц-импульса $E_{\text{ext}}(t) = E_{\text{THz}} e^{-\frac{4t^2}{\tau^2}} \frac{\sin z}{z}$, $z = \omega_{\text{THz}} t$,

ω_{THz} и τ – центральная частота и обратное затухание ТГц-поля, соответственно. Эти параметры выбирались для совпадения временной формы расчетного импульса с экспериментальным и равны:

$\omega_{\text{THz}} = 2\pi \cdot 1.5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $\tau = 0.5$ пс. Деполяризующее поле прямо пропорционально поляризации

$$E_1(t) = E_{0,\text{dep}} \frac{P(t)}{P_{\text{S}}},$$

где P_{S} – спонтанная поляризация, соответствующая положению в одном из минимумов [21], а деполяризующее поле $E_{0,\text{dep}} = \frac{P_{\text{S}}}{\epsilon \epsilon_0}$.

Окончательно, с учетом введенных обозначений, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{P} + \gamma_{\text{P}} \dot{P} + \frac{1}{\mu} (2a_1 P + 4a_{11} P^3 + 6a_{111} P^5 + 8a_{1111} P^7) = \\ = -\frac{1}{\mu} (C_1 \xi_{\text{IR}} + C_2 P \xi_{\text{IR}}^2) + \frac{1}{\mu} E(t), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\ddot{\xi}_{\text{IR}} = 2\gamma_{\text{IR}} \dot{\xi}_{\text{IR}} + \omega_{\text{IR}}^2 \xi_{\text{IR}} = -\frac{V}{m_{\text{IR}}} (C_1 P + C_2 P^2 \xi_{\text{IR}}). \quad (5)$$

Эксперимент, для которого проводилось моделирование, может быть реализован методом ТГц-накачки-зондирования в геометрии «на просвет». В результате воздействия ТГц-накачки возможно развитие нескольких сценариев (рис. 1): 1) амплитуды ТГц-поля недостаточно для преодоления эффективным зарядом потенциального барьера, система осциллирует в окрестности исходного минимума и возвращается в начальное состояние; 2) эффективный заряд преодолевает потенциальный барьер, но затем возвращается в исходный минимум; 3) эффективный заряд преодолевает потенциальный барьер и остается в противоположном минимуме двухъямного потенциала в течение долгого времени. Первые два сценария описывают динамическое переключение поляризации, а последний – перманентное.

При моделировании при помощи системы уравнений (4)–(5) рассчитывались временные зависимости поляризации, а также эффективной амплитуды колебаний ИК-моды, параллельных кристаллографической оси c . Варьировались следующие параметры: амплитуда ТГц-поля E_{THz} , величины констант фонон-фононного взаимодействия C_1 и C_2 , коэффициент затухания ИК-моды γ_{IR} .

Важнейшим варьируемым параметром являлось также начальное условие для амплитуды ИК-моды, определяемое интенсивностью оптического излучения. При моделировании использовались параметры разложения термодинамического потенциала в виде ряда по степеням параметра порядка (далее – разложения Ландау) для пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ из работы [22]: $a_1 = -0.13 \cdot 10^8$ Дж·м/Кл², $a_{11} = -1.33 \cdot 10^8$ Дж·м⁵/Кл⁴, $a_{111} = 1.03 \cdot 10^9$ Дж·м⁹/Кл⁶, $a_{1111} = 3.09 \cdot 10^{10}$ Дж·м¹³/Кл⁸.

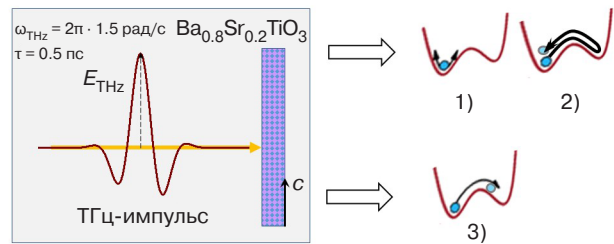


Рис. 1. Схема эксперимента, для которого выполняется моделирование, и схематичное представление ТГц-индуцированных процессов рассматриваемых сценариев переключения поляризации

В качестве резонансной частоты ИК-фонона выбиралась частота $\omega_{\text{IR}}/2\pi = 7.55$ ТГц, что соответствует частоте моды $A_1(\text{TO}^4)$ [23]. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Первый расчет был сделан при изменении начальных условий для ИК-моды ($A_{\text{IR}} = 0.1\text{--}0.23$ Å), при этом величина амплитуды ТГц-поля была незначительной (неспособной привести к переключению поляризации, см. нижнюю кривую на рис. 2б). В расчетах принимается, что в начальный момент суммарная поляризация рассматриваемого массива ячеек равна нулю. Остальные параметры выбирались следующими: $\gamma_{\text{IR}} = 0.5$ пс⁻¹, $\gamma_{\text{P}} = 2$ пс⁻¹, $C_1 = 5 \cdot 10^{17}$ Дж/(Кл·м²), $C_2 = 5 \cdot 10^{29}$ Дж/(Кл²·м).

Соответствующие временные зависимости амплитуды самой ИК-моды и сегнетоэлектрической поляризации представлены на рис. 2а и б. На нижнем графике на рис. 2б показана временная зависимость ТГц-поля (бордовая тонкая линия). На вставках: спектры поляризации (б) для $A_{\text{IR}} = 0.23$ Å, (в) для $E_{\text{THz}} = 0.8$ МВ/см. Графики смещены по вертикальной оси для наглядности. Динамическое переключение поляризации происходит уже при начальной амплитуде колебаний ИК-моды $A_{\text{IR}} = 0.13$ Å.

При увеличении A_{IR} динамическое переключение поляризации наблюдается на всех кривых. Однако в силу стохастичности решения уравнения Ландау – Халатникова при малых изменениях варьируемых параметров перманентное переключение, т.е. переход из одного из минимумов потенциальной ямы в другой без обратного перехода на больших временах, возможно не для всех значений параметров (на рис. 2. перманентного перехода нет при $A_{\text{IR}} = 0.17$ Å).

В спектре поляризации (вставка на рис. 2б) проявляются частоты обеих мод: полярной – в области 1–2 ТГц и ИК – в области 7.55 ТГц. Поскольку в момент времени задержки, соответствующей воздействию ТГц-импульса (2 пс), никаких особенностей на временных зависимостях поляризации не наблюдается, то можно утверждать, что наблюдаемые эффекты связаны только с воздействием когерентного оптического фонона.

Рассмотрим теперь случай слабого начального ИК-колебания ($A_{\text{IR}} = 0.125$ Å), неспособного вызвать динамическое переключение поляризации, но будем увеличивать ТГц поле. Переключение появляется при $E_{\text{THz}} \geq 0.8$ МВ/см. При этом в спектрах

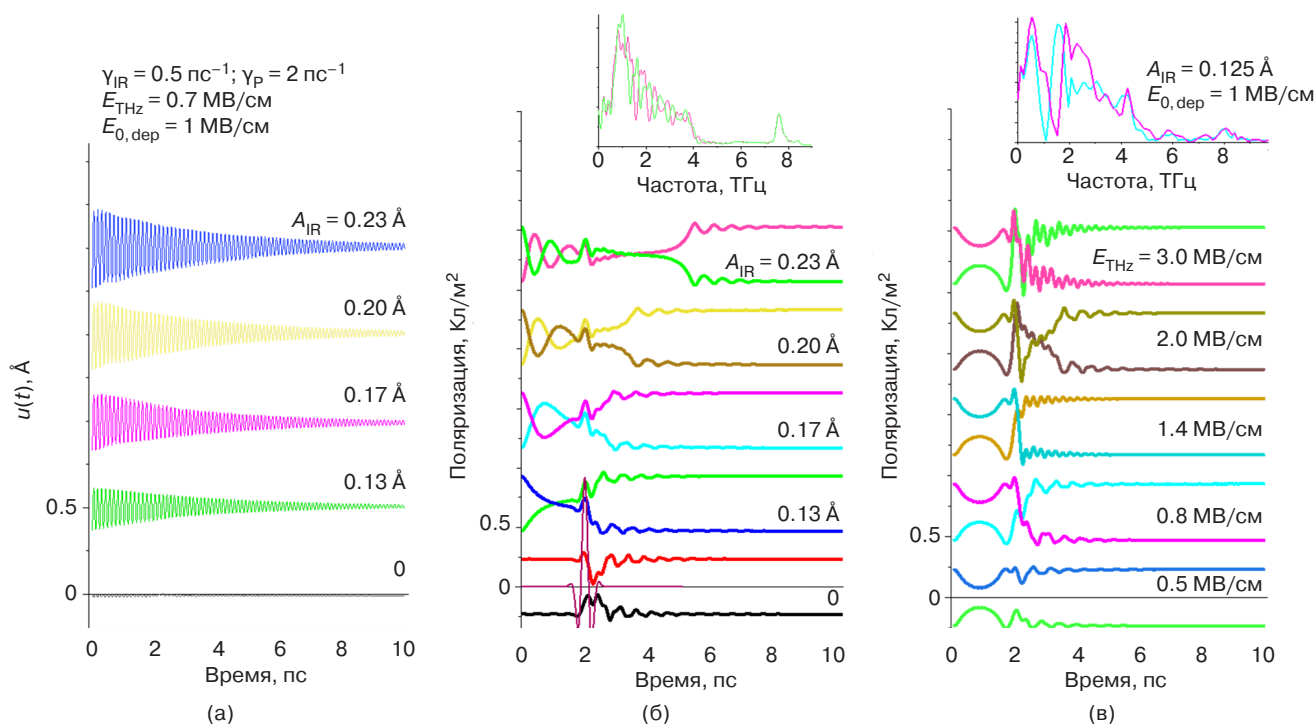


Рис. 2. Временные зависимости:

- (а) временные зависимости эффективной координаты $u(t)$ ИК-моды, рассчитанные при варьировании начальной эффективной амплитуды ИК-моды при малом поле ТГц-импульса A_{IR} (значения констант фонон-фононного взаимодействия приняты равными $C_1 = 5 \cdot 10^{17}$ Дж/(Кл·м²), $C_2 = 5 \cdot 10^{29}$ Дж/(Кл²·м));
- (б), (в) временные зависимости поляризации в ячейках с противоположным начальным положением эффективного заряда, рассчитанные в рамках рассматриваемой модели при варьировании A_{IR} (б) и поля ТГц-импульса при малой начальной амплитуде ИК-моды (в)

⁴ TO (transverse optical mode) – поперечная колебательная мода.

поляризации ИК-мода проявляется слабо (вставка на рис. 2в). Увеличивая амплитуду ТГц-поля, получаем устойчивое переключение поляризации.

В целом, рассмотренная система уравнений действительно описывает переключение поляризации под действием ТГц-импульса при предварительном возбуждении когерентного фона фемтосекундным оптическим импульсом. Критическое воздействие ТГц-импульса, приводящее к возбуждению фона, наступает при условии, когда ТГц-импульс имеет энергию, несколько меньшую (в наших расчетах – максимум на 20%) энергии, требуемой для переключения без оптического воздействия. Тогда совместное действие этих двух возбуждений приводит к переключению поляризации.

Влияние дополнительного внешнего электрического поля

Рассмотрим влияние дополнительно приложенного к образцу электрического поля E_0 , направленного параллельно полю ТГц-импульса E_{THz} в плоскости поверхности материала. В обоих случаях напряженности поля выбираются такими, чтобы одно поле в отсутствие другого не вызывало переключения поляризации. В первом случае это условие соответствует $E_{\text{THz}} = 0.7 \text{ МВ/см}$ ($E_0 = 0$), во втором: $E_0 = 0.5 \text{ МВ/см}$ ($E_{\text{THz}} = 0$). На рис. 3 представлены результаты моделирования. Графики смещены по вертикальной оси для наглядности.

При одном и том же поле ТГц-импульса (рис. 3а) постоянное поле с $E_0 \geq 0.1 \text{ МВ/см}$ ($E_0/E_{\text{THz}} = 0.14$) приводит к переключению поляризации. При этом

также при некоторых значениях постоянного поля ($E_0 = 1 \text{ МВ/см}$) оба иона возвращаются в исходное состояние. При полях $E_0 \geq 0.1 \text{ МВ/см}$ во время, предшествующее ТГц-импульсу, наблюдаются колебания, вызванные воздействием только постоянного поля. Совместное воздействие постоянного и ТГц-полей приводит к динамическому переключению поляризации в обеих ячейках вплоть до $E_0 = 1.5 \text{ МВ/см}$ ($E_0/E_{\text{THz}} = 2.14$). Далее воздействие ТГц-импульса практически не сказывается, вся система переключается под действием постоянного поля, что приводит к однородной поляризации в направлении постоянного поля.

При увеличении амплитуды ТГц-поля и сохранении величины напряженности постоянного поля (рис. 3б) динамическое переключение наблюдается, начиная с $E_{\text{THz}} = 0.5 \text{ МВ/см}$ ($E_0/E_{\text{THz}} = 1$). При некоторых значениях ТГц-поля перманентное переключение отсутствует в обоих ветвях ($0.9 \text{ МВ/см} < E_{\text{THz}} < 1.2 \text{ МВ/см}$), причем поведение системы при положительном (сонаправленном с полем ТГц-импульса в точке его максимальной амплитуды) и отрицательном значениях постоянного поля различно. На рис. 3б приведены зависимости при $E_0 = -1 \text{ МВ/см}$, в которых отсутствует даже динамическое переключение (поляризация не пересекает ось координат). Дальнейшее увеличение поля ТГц-импульса приводит к преобладанию отклика на этот импульс, хотя постоянное поле и оказывает небольшое влияние на зависимость поляризации от времени.

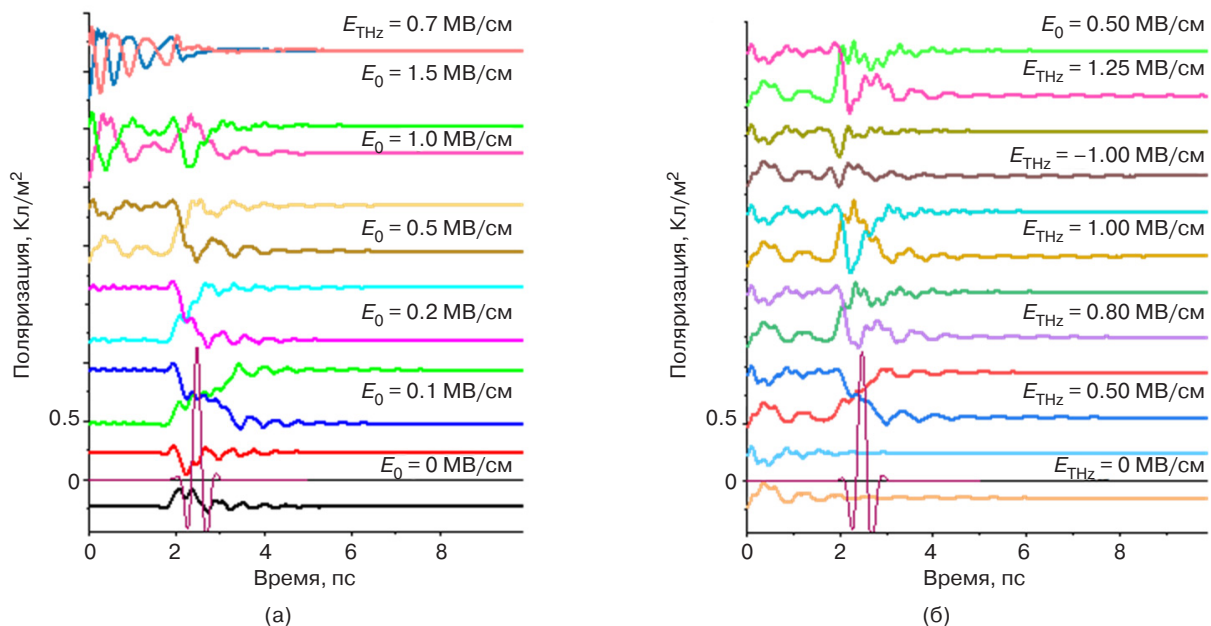


Рис. 3. Временные зависимости поляризации при приложении дополнительного постоянного электрического поля: (а) увеличение напряженности постоянного поля при сохранении амплитуды ТГц-импульса, (б) увеличение амплитуды ТГц-импульса при сохранении напряженности постоянного поля

Следует отметить, что все представленные зависимости иллюстративны. Временное поведение поляризации зависит от многих параметров (констант разложения Ландау и связанной с ними частотой, а также коэффициента мягкой моды).

Тем не менее, важным результатом этих расчетов является установление того факта, что даже небольшое постоянное поле может эффективно способствовать переключению поляризации. Этот результат крайне важен для экспериментального наблюдения переключения поляризации. Большие значения ТГц-поля, во-первых, не всегда достижимы, а во-вторых, могут приводить к необратимым изменениям физических свойств сегнетоэлектрических образцов [24]. Отметим также, что эффект усиления влияния ТГц-поля наблюдался ранее в магнитных материалах при исследовании переключения намагниченности в постоянном магнитном поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый подход к описанию системы с поляризацией в качестве параметра порядка, предварительно подвергшейся воздействию фемтосекундного оптического импульса, вызвавшего возбуждение фононной моды, взаимодействующей впоследствии с мощным ТГц-импульсом. Подход основан на системе уравнений, состоящей из уравнения Ландау – Халатникова, где в качестве вынуждающей силы выступают электрическое поле ТГц-импульса и фонон-фононное взаимодействие, и уравнения колебаний фононной моды, где в качестве вынуждающей силы выступает фонон-фононное взаимодействие. Новизна подхода заключается во взаимодействии ТГц-импульса с ранее когерентно возбужденной фононной модой, имеющей значительную амплитуду.

Показано, что во временном интервале существования фононных колебаний высокой амплитуды (что определяется константой затухания этой моды) переключение происходит в момент прихода ТГц-импульса. Возбуждение фонона оказывает критическое воздействие при условии, когда ТГц-импульс имеет энергию, несколько меньшую (в наших расчетах максимум на 20%) энергии,

требуемой для переключения без оптического воздействия. Тогда совместное действие этих двух возбуждений приводит к переключению поляризации. Если же поле большое (когда поляризация может переключаться единственно ТГц-импульсом), увеличение амплитуды фононных колебаний не влияет на процесс переключения. Таким образом, предварительное оптическое воздействие способно вызывать переключение поляризации при меньших ТГц-полях, чем порог переключения, что имеет важнейшее значение для применений, поскольку позволяет использовать ТГц-источники меньшей мощности.

В той же модели рассматривалась дополнительная вынуждающая сила в уравнении Ландау – Халатникова. Показано, что эффективно могут способствовать переключению только небольшие, далекие от насыщающих постоянные поля. Результат важен с точки зрения его использования в эксперименте. Ранее был получен экспериментальный негативный результат: приложение значительного по величине поля не влияло на переключение поляризации. Представленная модель может служить объяснением этого результата.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичном финансировании Российским научным фондом, грант № 25-19-00575 (моделирование) и Министерством науки и высшего образования РФ, государственное задание для университетов № FSFZ-2023-0005 (разработка кода, начальные этапы моделирования, экспериментальная часть).

ACKNOWLEDGMENTS

The work was partially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-19-00575 (modeling) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State Assignment for Universities No. FSFZ-2023-0005 (code development, initial stages of modeling, experimental section).

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Leitenstorfer A., Moskalenko A.S., Kampftrath T., Kono J., Castro-Camus E., Peng K., Qureshi N., Turchinovich D., Tanaka K., Markelz A.G., Havenith M., Hough C., Joyce H.J., Padilla W.J., Zhou B., Kim K-Y., Zhang X.-C., Uhd Jepsen P., Dhillon S., Vitiello M., Linfield E., Davies A.G., Hoffmann M.C., Lewis R., Tonouchi M., Klarskov P., Seifert T.S., Gerasimenko Y.A., Mihailovic D., Huber R., Boland J.L., Mitrofanov O., Dean P., Ellison B.N., Huggard P.G., Rea S.P., Walker C., Leisawitz D.T., Gao J.R., Li C., Chen Q., Valúsis G., Wallace V.P., Pickwell-MacPherson E., Shang X., Hesler J., Ridler N., Renaud C.C., Kallfass I., Nagatsuma T., Zeitler J.A., Arnone D., Johnston M.B., Cunningham J. The 2023 terahertz science and technology roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2023;56:223001(67 p.). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acbe4c>

2. Brekhov K., Bilyk V., Ovchinnikov A., Chefonov O., Mukhortov V., Mishina E. Resonant Excitation of the Ferroelectric Soft Mode by a Narrow-Band THz Pulse. *Nanomaterials*. 2023;13(13):1961. <https://doi.org/10.3390/nano13131961>
3. Monnai Y., Lu X., Sengupta K. Terahertz Beam Steering: from Fundamentals to Applications. *J. Infrared, Milli. Terahz Waves*. 2023;44(3):169–211. <https://doi.org/10.1007/s10762-022-00902-1>
4. Quy V.K., Chehri A., Quy N.M., Han N.D., Ban N.T. Innovative Trends in the 6G Era: A Comprehensive Survey of Architecture, Applications, Technologies, and Challenges. *IEEE Access*. 2023;11:39824–39844. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3269297>
5. Katayama I., Aoki H., Takeda J., Shimosato H., Ashida M., Kinjo R., Kawayama I., Tonouchi M., Nagai M., Tanaka K. Ferroelectric Soft Mode in a SrTiO₃ Thin Film Impulsively Driven to the Anharmonic Regime Using Intense Picosecond Terahertz Pulses. *Phys. Rev. Lett.* 2012;108(9):097401(5 p.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.097401>
6. Hoffmann M.C., Hwang H.Y., Brandt N.C., et al. Terahertz-induced Kerr-effect in Relaxor Ferroelectrics. *MRS Online Proceedings Library*. 2009;1230:408. <https://doi.org/10.1557/PROC-1230-MM04-08>
7. Yamakawa H., Miyamoto T., Morimoto T., Takamura N., Liang S., Yoshimochi H., Terashige T., Kida N., Suda M., Yamamoto H.M., Mori H., Miyagawa K., Kanoda K., Okamoto H. Terahertz-field-induced polar charge order in electronic-type dielectrics. *Nat. Commun.* 2021;12:953(11 p.). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-20925-x>
8. Hamm P., Meuwly M., Johnson S.L., Beaud P., Staub U. Perspective: THz-driven nuclear dynamics from solids to molecules. *Struct. Dyn.* 2017;4(6):061601(19 p.). <https://doi.org/10.1063/1.4992050>
9. Chen F., Zhu Y., Liu S., Qi Y., Hwang H.Y., Brandt N.C., Lu J., Quirin F., Enquist H., Zalden P., Hu T., Goodfellow J., Sher M.-J., Hoffmann M.C., Zhu D., Lemke H., Glownia J., Chollet M., Damodaran, Park J., Cai Z., Jung I.W., Highland M.J., Walko D.A., Freeland J.W., Evans P.G., Vailionis A., Larsson J., Nelson K.A., Rappe A.M., Sokolowski-Tinten K., Martin L.W., Wen H., Lindenberg A.M. Ultrafast terahertz-field-driven ionic response in ferroelectric BaTiO₃. *Phys. Rev. B*. 2016;94(18):180104(6 p.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.180104>
10. Kozina M., Pancaldi M., Bernhard C., van Driel T., Glownia J.M., Marsik P., Radovic M., Vaz C.A.F., Zhu D., Bonetti S., Staub U., Hoffmann M.C. Local terahertz field enhancement for time-resolved x-ray diffraction. *Appl. Phys. Lett.* 2017;110(8):081106. <https://doi.org/10.1063/1.4977088>
11. Kozina M., van Driel T., Chollet M., Sato T., Glownia J.M., Wandel S., Radovic M., Staub U., Hoffmann M.C. Ultrafast X-ray diffraction probe of terahertz field-driven soft mode dynamics in SrTiO₃. *Struct. Dyn.* 2017;4(5):054301(7 p.). <https://doi.org/10.1063/1.4983153>
12. Grishunin K.A., Ilyin N.A., Sherstyuk N.E., Mishina E.D., Kimel A., Mukhortov V.M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B. THz Electric Field-Induced Second Harmonic Generation in Inorganic Ferroelectric. *Sci. Rep.* 2017;7(1):687. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00704-9>
13. Mankowsky R., von Hoegen A., Först M., Cavalleri A. Ultrafast Reversal of the Ferroelectric Polarization. *Phys. Rev. Lett.* 2017;118:197601(5 p.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.197601>
14. Bilyk V., Mishina E., Sherstyuk N., Bush A., Ovchinnikov A., Agranat M. Transient polarization reversal using intense THz pulse in silicon-doped lead germanate. *Physica Status Solidi (RRL). Rapid Research Letters*. 2021;15(1):2000460(5 p.). <https://doi.org/10.1002/pssr.202000460>
15. Ландау Л.Д., Халатников И.М. Об аномальном поглощении звука вблизи точек фазового перехода второго рода. *Доклады АН СССР*. 1954;96:469–472.
[Landau L.D., Khalatnikov I.M. On anomalous absorption of sound near a second order phase transition point. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1954;96:469–472 (in Russ.).]
16. Juraschek D.M., Fechner M., Spaldin N.A. Ultrafast Structure Switching through Nonlinear Phononics. *Phys. Rev. Lett.* 2017;118:054101(5 p.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.054101>
17. Radaelli P.G. Breaking symmetry with light: Ultrafast ferroelectricity and magnetism from three-phonon coupling. *Phys. Rev. B*. 2018;97:085145(9 p.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.085145>
18. Subedi A. Proposal for ultrafast switching of ferroelectrics using midinfrared pulses. *Phys. Rev. B*. 2015;92:214303(6 p.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.214303>
19. Mertelj T., Kabanov V.V. Comment on “Ultrafast Reversal of the Ferroelectric Polarization”. *Phys. Rev. Lett.* 2019;123:129701. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.123.129701>
20. Блинц Р., Жекш Б. *Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Динамика решетки*: пер. с англ. под ред. Л.А. Шувалова. М.: Мир; 1975, 398 с.
[Blinc R., Žekš B. *Soft Modes in Ferroelectrics and Antiferroelectrics*: transl. from Engl. Moscow: Nauka; 1975, 398 p. (In Russ.).]
[Blinc R., Žekš B. *Soft Modes in Ferroelectrics and Antiferroelectrics*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company; 1974, 317 p.]
21. Abalmasov V.A. Ultrafast reversal of the ferroelectric polarization by a midinfrared pulse. *Phys. Rev. B*. 2020;101:014102(8 p.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.014102>
22. Широков В.Б., Юзюк Ю.И., Калинин В.В., Леманов В.В. Материальные константы твердых растворов (Ba,Sr)TiO₃. *Физика твердого тела*. 2013;55(4):709–714. <https://elibrary.ru/rcsvjh>
[Original Russian Text: Shirokov V.B., Yuzyuk Yu.I., Kalinchuk V.V., Lemanov V.V. Material constants of (Ba,Sr)TiO₃ solid solutions. *Fizika tverdogo tela*. 2013;55(4):709–714 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rcsvjh>]
[Shirokov V.B., Yuzyuk Yu.I., Kalinchuk V.V., Lemanov V.V. Material constants of (Ba,Sr)TiO₃ solid solutions. *Phys. Solid State*. 2013;55:773–779. <https://doi.org/10.1134/S1063783413040276>]

23. Anokhin A.S., Yuzyuk Yu.I., Lyanguzov N.V., Razumnaya A.G., Stryukov D.V., Bunina O.A., Golovko Yu.I., Shirokov V.B., Mukhortov V.M., El Marssi M. Direct transition from the rhombohedral ferroelectric to the paraelectric phase in a (Ba,Sr)TiO₃ thin film on a (111)MgO substrate. *Europhysics Letters*. 2015;112(4):47001(6 p). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/112/47001>
24. Kwaaitaal M., Lourens D.G., Davies C.S., Kirilyuk A. Disentangling thermal birefringence and strain in the all-optical switching of ferroelectric polarization. *Sci. Rep.* 2024;14:24956(9 p.). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75670-0>

Об авторах

Шерстюк Наталия Эдуардовна, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nesherstuk@mail.ru. Scopus Author ID 6602267129, ResearcherID A-3460-2014, SPIN-код РИНЦ 9016-8296, <https://orcid.org/0000-0002-7068-4028>

Брехов Кирилл Алексеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, лаборатория физики нейроморфных вычислительных систем, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: brekhov_ka@mail.ru. Scopus Author ID 55452447100, ResearcherID: Q-1014-2017, SPIN-код РИНЦ 9957-7662, <https://orcid.org/0000-0001-9091-2609>

Мишина Елена Дмитриевна, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mishina_elena57@mail.ru. Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, SPIN-код РИНЦ 9352-8339, <https://orcid.org/0000-0003-0387-5016>

About the Authors

Natalia E. Sherstyuk, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nesherstuk@mail.ru. Scopus Author ID 6602267129, ResearcherID A-3460-2014, RSCI SPIN-code 9016-8296, <https://orcid.org/0000-0002-7068-4028>

Kirill A. Brekhov, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Laboratory of Physics for Neuromorphic Computing Systems, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: brekhov_ka@mail.ru. Scopus Author ID 55452447100, ResearcherID: Q-1014-2017, RSCI SPIN-code 9957-7662, <https://orcid.org/0000-0001-9091-2609>

Elena D. Mishina, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnology, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mishina_elena57@mail.ru. Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, RSCI SPIN-code 9352-8339, <https://orcid.org/0000-0003-0387-5016>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.9:539.17

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-113-123>

EDN CZALAC



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние неоднородностей поршня и облучения на формирование гиперзвуковой ударной волны в лазерной ударной трубе

И.Г. Лебо[®], В.А. Комарова, М.А. Рыжков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: lebo@mirea.ru

• Поступила: 12.09.2025 • Доработана: 24.11.2025 • Принята к опубликованию: 05.02.2026

Резюме

Цели. Цель исследования – изучение влияния неоднородностей интенсивности лазерного излучения и толщины поршня (лавсановой пленки) на формирование гиперзвуковых потоков в лазерной ударной трубе (ЛУТ), сравнение условий формирования и динамики распространения ударных волн (УВ) в ЛУТ в случаях «открытой» и «закрытой» плазменной короны.

Методы. Методы математического моделирования, анализ результатов вычислительных экспериментов, выполненных с помощью двумерной лагранжевой программы *Atlant_C* в цилиндрических координатах.

Результаты. Представлены результаты четырех серий расчетов динамики гиперзвуковых УВ в ЛУТ: 1) формирование и распространение УВ в профилированной мишени; 2) формирование и распространение УВ при сильной неоднородности падающего лазерного потока; 3) сравнение динамики УВ при различных значениях поглощенной энергии лазерного импульса и толщинах мишени (поршня); 4) сравнение динамики гиперзвуковых УВ с данными экспериментов в случаях «открытой» и «закрытой» плазменной короны.

Выводы. На основании данных вычислительных экспериментов можно сделать следующие выводы: 1) по мере распространения сильной УВ в профилированном поршне происходит выравнивание давления и плотности в поперечном направлении. Если длительность лазерного импульса заметно больше, чем время прохождения поперечных УВ в мишени (поршне), то в газе внутри ячейки ЛУТ происходит вылаживание фронта УВ; 2) в том случае, когда в падающем лазерном импульсе имеются значительные выбросы интенсивностей излучения – спеклы (~10% от энергии импульса), в ускоренном поршне формируются струи, которые в газе могут обгонять фронт УВ; 3) при лазерном нагреве мишени в режиме «закрытой» короны скорость поршня в ЛУТ возрастает примерно на 40%; 4) при разрушении поршня из-за сильной неоднородности облучения или развития гидродинамической неустойчивости и фрагментации полимерной СН-пленки, может формироваться плотный турбулентный слой, который будет также создавать УВ в газе.

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительный эксперимент, лазерная ударная труба, двумерная лагранжевая программа *Atlant_C*

Для цитирования: Лебо И.Г., Комарова В.А., Рыжков М.А. Влияние неоднородностей поршня и облучения на формирование гиперзвуковой ударной волны в лазерной ударной трубе. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):113–123. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-113-123>, <https://www.elibrary.ru/CZALAC>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Influence of piston nonuniformity and illumination on the formation of a hypersonic shock wave in a laser-driven shock wave

Ivan G. Lebo[®], Victoria A. Komarova, Maxim A. Ryzhkov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: lebo@mirea.ru

• Submitted: 12.09.2025 • Revised: 24.11.2025 • Accepted: 05.02.2026

Abstract

Objectives. The study investigates the influence of inhomogeneities of laser flux intensity and piston (mylar film) thickness in a laser shock tube by comparing the conditions for the formation and dynamics of shock wave propagation in a laser shock tube in the case of an open and closed plasma corona.

Methods. Along with mathematical modeling methods, analysis of the results of computational experiments was carried out using the two-dimensional Lagrangian program *Atlant_C* in cylindrical coordinates were used.

Results. The results of four series of calculations of the dynamics of hypersonic shock waves in a laser shock tube are presented: (1) formation and propagation of a shock wave in a profiled target; (2) formation and propagation of a shock wave with strong inhomogeneity of the incident laser flux; (3) comparison of the dynamics of shock waves for different values of the absorbed laser pulse energy and target (piston) thicknesses; (4) comparison of shock wave dynamics in the cases of open and closed plasma coronas.

Conclusions. Based on the results of the computational experiments, the following conclusions can be drawn: (1) as a strong shock wave propagates in the profiled piston, the pressure and density equalize in the transverse direction. If the duration of the laser pulse is noticeably longer than the transit time of the transverse shock waves in the target (piston), the shock wave front flattens out in the gas inside the LUT cell; (2) in cases when the incident laser pulse contains significant emission intensities or speckles (more than 10% of the pulse energy), jets are formed in the accelerated piston, which can overtake the shock wave front in the gas; (3) during laser heating of the target in the closed corona mode, the propagation velocity of the shock wave front increases by ~40%; (4) when the piston is destroyed due to strong nonuniformity of irradiation or development of hydrodynamic instability and fragmentation of the polymer CH film, a dense turbulent layer can form, which will also create a shock wave in the gas. This case requires separate consideration.

Keywords: mathematical modeling, computational experiment, laser shock tube, two-dimensional Lagrangian code *Atlant_C*

For citation: Lebo I.G., Komarova V.A., Ryzhkov M.A. Influence of piston nonuniformity and illumination on the formation of a hypersonic shock wave in a laser-driven shock wave. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):113–123. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-113-123>, <https://www.elibrary.ru/CZALAC>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных и пока нерешенных проблем в лазерном термоядерном синтезе является развитие гидродинамической неустойчивости в процессе ускорения и сжатия термоядерных мишеней. Подобные задачи возникают также в астрофизике и в ряде прикладных задач, связанных с высокой концентрацией энергии [1, 2]. Построение физико-математической модели перехода от эволюционной стадии развития гидродинамической неустойчивости к турбулентному состоянию имеет фундаментальное значение в современной теоретической физике.

Уравнения газовой динамики, описывающие развитие гидродинамической неустойчивости, являются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП) в двумерной и трехмерной геометриях. Они, как правило, не имеют аналитических решений и требуют применения методов математического моделирования для анализа развития этих процессов. Для этих целей разрабатываются сложные программные комплексы, которые необходимо тестировать на упрощенных задачах (в частности, на автомодельных решениях [3] и линеаризованных уравнениях, описывающих поведение малых возмущений газодинамических величин [4]), сравнения с данными натурных экспериментов [2, 5–8].

Для решения таких задач разрабатываются алгоритмы и математические коды [2, 5], позволяющие решать численно систему ДУЧП. Используется, как правило, метод конечных разностей [9–12]. Поскольку исследуемые объекты имеют сложную конфигурацию, требующую использования разностных сеток с большим количеством узлов и, соответственно, большую оперативную память и быстродействие компьютера, то для моделирования физических процессов часто приходится прибегать к разработке параллельных алгоритмов и проведению расчетов на многопроцессорных комплексах [13]¹.

В представленной статье с помощью методов математического моделирования исследуется ускорение тонких пленок в лазерной ударной трубе (ЛУТ) [14]. Достоинствами такого устройства являются: 1) формирование гиперзвуковых

ударных волн (УВ) с числами Маха $M_x = V_{sw}/V_s \geq 10$ (здесь V_{sw} – скорость распространения фронта УВ (shock wave), V_s – скорость звука (sound) в газе перед фронтом такой волны) и скоростей течения газов за фронтом УВ порядка первой космической скорости; 2) миниатюрность ячейки ЛУТ и возможность быстрой ее замены; 3) возможность создания сложных конфигураций препятствий для обтекания газа; 4) сравнительно малый расход материалов (например, инертных газов или дорогостоящих смесей).

1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчеты сделаны с помощью двумерной лагранжевой программы *Atlant_C* в цилиндрической геометрии (r – радиус, z – координата вдоль оси, t – время) [5]. Эта программа разработана коллективом авторов и позволяет решать численно нелинейные уравнения плазменной динамики в лагранжевых координатах в двумерной геометрии [5]. Достоинство лагранжевых координат в том, что они «вморожены» в вещество. Поэтому при сублимации и сжатии этого вещества (т.е. при изменении объемов на несколько порядков величины) удастся сохранить удовлетворительную точность аппроксимации². Ниже представлены основные уравнения плазменной динамики в двухтемпературном приближении, которые решаются в программе *Atlant_C*.

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \vec{v},$$

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla(Z_i P_e + P_i),$$

$$Z_i \rho \frac{dE_e}{dt} = -Z_i P_e \nabla \vec{v} + \nabla(\kappa_e \nabla T_e) - Q_{ei} - R_{rad}(\rho, T_e) + \nabla \vec{q},$$

$$\rho \frac{dE_i}{dt} = -P_i \nabla \vec{v} + \nabla(\kappa_i \nabla T_i) + Q_{ei},$$

$$\left(\frac{\vec{q}}{|\vec{q}|}, \nabla \right) \vec{q} = \kappa(\rho, T_e) \vec{q},$$

$$P_e = P_e(\rho, T_e), P_i = P_i(\rho, T_i),$$

$$E_e = E_e(\rho, T_e), E_i = E_i(\rho, T_i),$$

$$Q_{ei} = Q_0(\rho, T_e) \frac{T_e - T_i}{T_e^{1.5}} \rho^2.$$

¹ В [13] имеется опечатка в формуле (2) на с. 10: перед оператором div должен стоять знак «+». [In [13], there is a typo in formula (2) on p. 10: the operator div should be preceded by a “+” sign.]

² Лебо И.Г., Лебо А.И. *Современные проблемы математического моделирования*. М.: РТУ МИРЭА; 2025, 208 с. [Lebo I.G., Lebo A.I. *Contemporary Issues in Mathematical Modeling*. M.: RTU MIREA; 2025, 208 p. (In Russ.).]

Здесь ρ , P_e , P_i , T_e , T_i , E_e , E_i – плотность, давление температура и удельная внутренняя энергия электронной (индекс e) и ионной (индекс i) компонент; Q_{ei} – обмен тепловой мощности между компонентами; κ_e , κ_i – коэффициенты электронной и ионной теплопроводностей; \vec{q} – интенсивность лазерного излучения; \vec{v} – вектор скорости; Z_i – усредненный по лагранжевой ячейке заряд ионов плазмы; $R_{\text{rad}}(\rho, T_e)$ – мощность переизлучения из плазмы; Q_0 – масштабный множитель.

Лазерный поток падает на внешнюю сторону пленки. На этой границе задаются условия: давление на границе равно давлению в крайней лагранжевой ячейке, а потоки теплопроводности равны нулю. На оси симметрии, на боковой поверхности и на противоположной стороне цилиндрической области задаются нормальный компонент скорости и тепловые потоки, равные нулю.

Исследования формирования и распространения УВ в ячейке ЛУТ проводились на основании анализа данных вычислительных экспериментов [15]. Размер цилиндрической области: $0 < z < (1 + d_0)$ см, $0 < r < R_{\text{max}} = 0.282$ см, d_0 – толщина пленки. Лазерный (laser) импульс имел временную форму в виде трапеции с вершинами $t_1 = 0$ нс, $t_2 = 30$ нс, $t_3 = 60$ нс, $t_4 = 100$ нс с энергией E_{las} . В представленных расчетах предполагалось 100%-е поглощение энергии. Параметры импульса КгF-лазера (длина волны излучения в ультрафиолетовом диапазоне $\lambda = 0.248$ мкм) соответствуют установке «GARPUN» (Москва, ФИАН³ [16]).

Ячейка ЛУТ была заполнена воздухом (Air) с начальной плотностью $\rho = 1.29 \cdot 10^{-3}$ г/см³ и давлением $P = 1$ атм.

2. ДВУМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ПОРШНЯ И ФОРМИРОВАНИЯ УВ В ГАЗЕ

Проведены расчеты формирования и распространения УВ в воздухе внутри ЛУТ. Мишень (поршень) состояла из полимерной пленки (СН), которая располагалась на верхнем торце цилиндрической ячейки ЛУТ, заполненной воздухом (Air). Размеры ячейки ЛУТ соответствовали размерам расчетной области. Форма пленки, ее толщина d_0 , энергия лазерного импульса E_{las} и распределение интенсивности излучения вдоль радиуса r варьировались.

В первой серии расчетов моделировалось формирование УВ в воздухе в том случае, если поршень имел ступенчатую или профилированную форму (рис. 1а). Были сделаны 2 расчета: 1) «подошва» $d_1 = 1.5$ мкм, «ступенька» $d = 1.5$ мкм, $d_0 = d_1 + d = 3.0$ мкм (вариант Zvor6); 2) «подошва» $d_1 = 2.0$ мкм, «ступенька» $d = 3.0$ мкм, $d_0 = d_1 + d = 5.0$ мкм (вариант Zvor8).

Лазерное излучение падает на верхнюю поверхность слоя из СН. Навстречу лазерному пучку разлетается сублимированная часть пленки – «корона», а по неиспаренному веществу распространяется УВ, которая выходит на тыльную

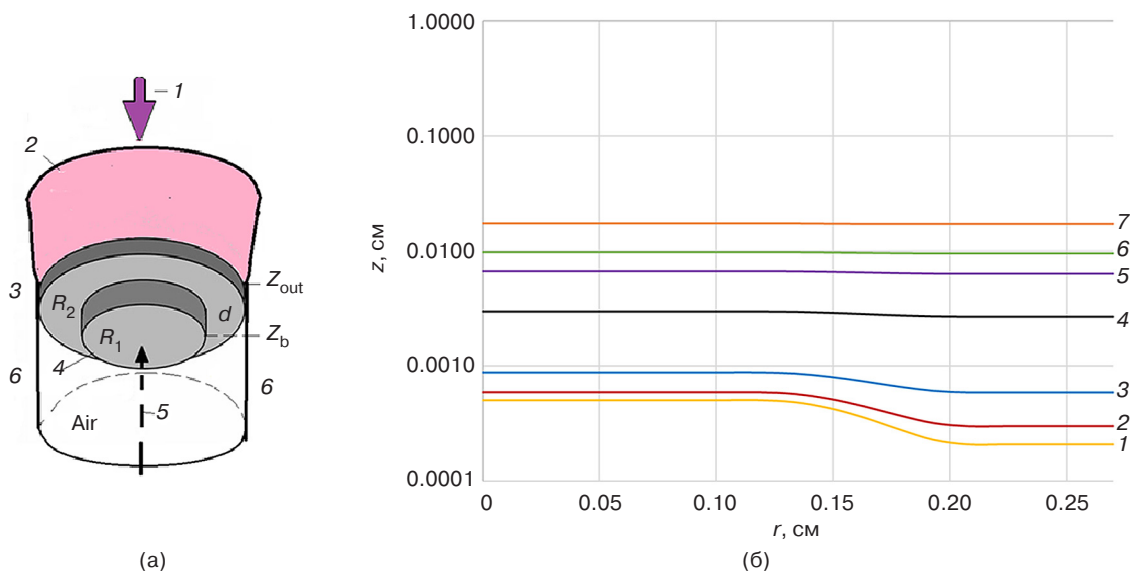


Рис. 1. Постановка вычислительного эксперимента:

1 – лазерный пучок, 2 – плазменная корона, 3 – полимерная «подошва» профилированной мишени толщины d_2 и радиуса R_2 , 4 – «ступенька» толщиной d и радиусом R_1 , 5 – направление оси Oz , 6 – стенки ячейки ЛУТ (а). Эволюция толщины слоя $d_0(r) = Z_{\text{out}}(r) - Z_{\text{b}}(r)$ на моменты времени t , нс: (1) 0, (2) 1, (3) 2, (4) 5, (5) 8, (6) 10, (7) 14; $Z_{\text{out}}(r)$, $Z_{\text{b}}(r)$ – контактные границы «вакуум–пленка» и «пленка–внутренний газ (Air)» (б)

³ Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук. <https://lebedev.ru/>. Дата обращения 12.09.2025. [Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. <https://lebedev.ru/>. Accessed September 12, 2025. (In Russ.)]

поверхность «подшвы», где происходит разгрузка и разлет вещества по направлению падения лазерного пучка (рис. 1а). В это же время по слою СН распространяются поперечные волны, которые стремятся выровнять давление и границы слоя (рис. 1б). Лазерный импульс заканчивается к моменту $t = 100$ нс. На начальной стадии толщина поршня больше у оси, но уже к моменту $t = 14$ нс плотный слой выравнивает свою внутреннюю $Z_b(r)$ и внешнюю $Z_{out}(r)$ границы, и толщина слоя СН практически не зависит от радиуса (рис. 1б и таблица).

В таблице в четвертом столбце приведена зависимость относительного отклонения толщины слоя

$$\beta = \frac{(d_0(R_{max}) - d_0(0)) \cdot 100\%}{d_0(R_{max}) + d_0(0)}$$

Таблица. Значения толщины поршня на оси, $d_0(0)$ вблизи стенки канала, $d_0(R_{max})$ и β в различные моменты времени t

t , нс	$d_0(0)$, см	$d_0(R_{max})$, см	β , %
0	$5.04 \cdot 10^{-4}$	$2.11 \cdot 10^{-4}$	41.0
1	$5.92 \cdot 10^{-4}$	$2.99 \cdot 10^{-4}$	32.8
2	$8.83 \cdot 10^{-4}$	$5.92 \cdot 10^{-4}$	19.8
5	$2.69 \cdot 10^{-3}$	$2.97 \cdot 10^{-3}$	5.1
8	$6.67 \cdot 10^{-3}$	$6.40 \cdot 10^{-3}$	2.1
10	$9.83 \cdot 10^{-3}$	$9.57 \cdot 10^{-3}$	1.34
14	$1.74 \cdot 10^{-2}$	$1.73 \cdot 10^{-2}$	0.32

Плотный слой неиспаренной пленки (поршень) с переменной плотностью $\rho \approx 0.05\text{--}1$ г/см³ двигается внутри ЛУТ со сверхзвуковой скоростью и формирует УВ в воздухе с практически плоским фронтом, хотя мелкомасштабные возмущения плотности и давления внутри этого слоя, а также фрагменты частиц пленки, могут существовать еще продолжительное время. Более того, из-за развития неустойчивости Рихтмайера – Мешкова [17, 18] вблизи контактной

границы Z эти мелкомасштабные возмущения могут развиваться и формировать турбулентный слой [19]. Моделирование этих процессов требует иных подходов и в настоящей работе не рассматривается.

К концу лазерного импульса $t = 100$ нс скорость контактной границы достигает $V_b \approx 4$ км/с. На рис. 2 показано распространение фронта УВ $Z_{sw}(t)$ в различные моменты времени.

В следующей серии расчетов моделировалось неоднородное облучение плоской мишени из СН (поршня) и формирование УВ в ЛУТ. Интенсивность лазерного потока имела следующий вид: $q(t, r) = I_{r1}(t)I_{r1}(r) + I_{r2}(t)I_{r2}(r)$.

Здесь функции $I_{r1}(t), I_{r2}(t)$ имеют вид трапеций,

$$\int_0^{t_4} I_{r1}(t)dt = E_{las1}, \int_0^{R_0} I_{r1}(r)rdr = 1, \int_0^{t_4} I_{r2}(t)dt = E_{las2}, \int_0^{R_0} I_{r2}(r)rdr = 1,$$

R_0 – поперечная граница области счета.

Если фронт первого импульса плоский, то второй импульс имеет гауссову форму: $I_{r2}(r) = \frac{C_2}{e^{r/R_f}}$, C_2 – нормировочная константа, R_f – радиус фокального пятна. Таким образом, моделировалось воздействие суперпозиции однородного импульса и спекла, имеющего эффективный радиус $R_f < R_0$.

Была проведена серия из пяти расчетов, моделирующих неоднородность облучения плоской мишени (варианты Zvor9): во всех вариантах $I_{r1}(r) = \text{const}$ при значениях $0 \leq r \leq R_0$, а временная форма в четырех вариантах – трапеция со значениями $t_1 = 0, t_2 = 30$ нс, $t_3 = 60$ нс, $t_4 = 100$ нс в вершинах трапеции. E_{las1}, E_{las2} менялись следующим образом: 1) $E_{las1} = 9.9$ Дж, $E_{las2} = 0.1$ Дж; 2) $E_{las1} = 9.7$ Дж, $E_{las2} = 0.3$ Дж; 3) $E_{las1} = 9.5$ Дж, $E_{las2} = 0.5$ Дж; 4) $E_{las1} = 9.0$ Дж, $E_{las2} = 1.0$ Дж. В варианте 5 использовались значения $E_{las1} = 9.0$ Дж, $E_{las2} = 1.0$ Дж, но была изменена временная форма импульса: длительность второго импульса была уменьшена в 2 раза: $t_2 = 15$ нс, $t_3 = 30$ нс, $t_4 = 50$ нс, что привело к увеличению в 2 раза пиковой интенсивности

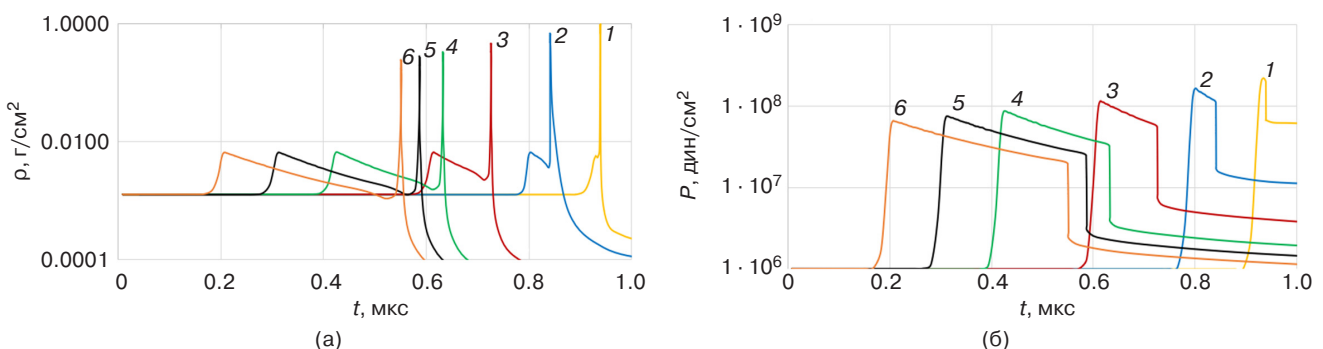


Рис. 2. Распределения: (а) плотности $\rho(z)$, (б) давления $P(z)$ при $r = 0$ на моменты времени t , мкс (1) 0.2, (2) 0.5, (3) 1.0, (4) 1.6, (5) 2.0, (6) 2.4

спекла. Суммарная поглощенная лазерная энергия во всех пяти вариантах равнялась 10 Дж, а $R_0 = R_{\max} = 0.282$ см, $R_f = 0.0705$ см. Расчеты были сделаны на разностных сетках (22×212), где 22 узла расположены вдоль оси $0r$ и 212 узлов – вдоль оси $0z$.

Наряду с общим ускорением пленки наблюдается ее деформация из-за неоднородности облучения. Поскольку вблизи оси существовала повышенная интенсивность излучения, то и скорость полета мишени в этой подобласти выше. Как и в первой серии расчетов, поперечные УВ частично выравнивают границу слоя $Z_b(r)$. Поэтому фронт УВ в газе имеет более пологую форму, чем поршень. В том случае, когда энергия второго

импульса составляла 10% от суммарного (т.е. варианты 4 и 5) к концу лазерного импульса ($t \geq 90$ нс) лагранжевая сетка «ломалась», и счет прекращался. Этот факт можно интерпретировать, как разрыв поршня. На рис. 3 и 4 показаны двумерные распределения плотности (ρ) и давления (P) на моменты времени $t = 100$ нс (конец действия лазерного импульса) и $t = 1500$ нс для варианта 3. К моменту $t = 1500$ нс поршень сильно деформирован. Вблизи оси ($r < 0.02$ см) формируется струя, которая создает вторую расходящуюся от оси УВ. К периферии расчетной области общий фронт УВ частично выполаживается, и большая часть поверхности, за исключением окрестности оси $0z$, приобретает почти плоскую форму.

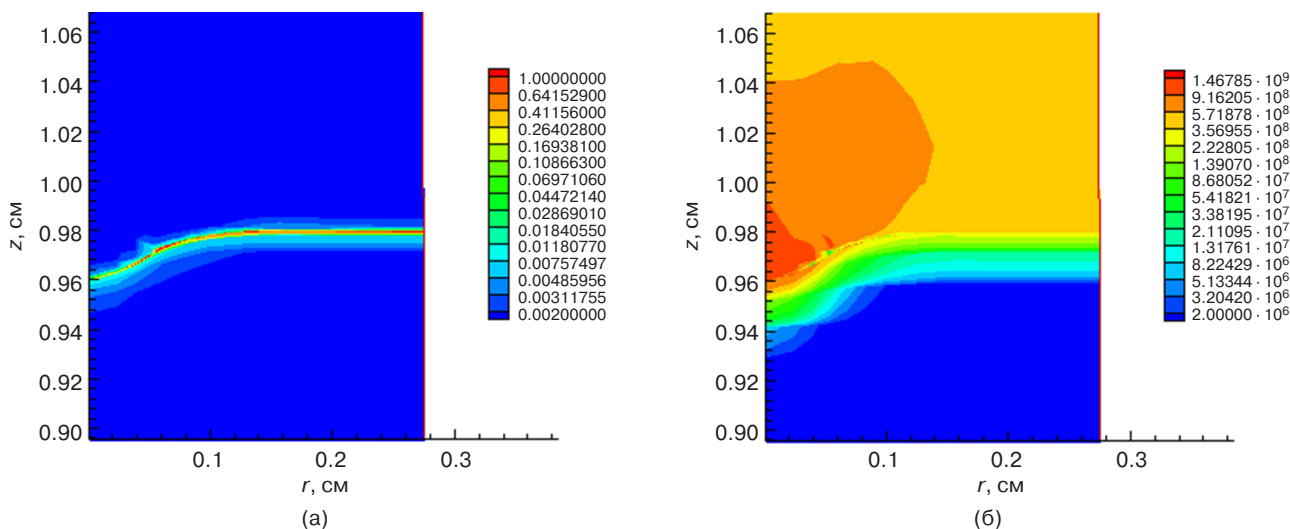


Рис. 3. Поля плотности (а) и давления (б) на момент времени $t = 100$ нс

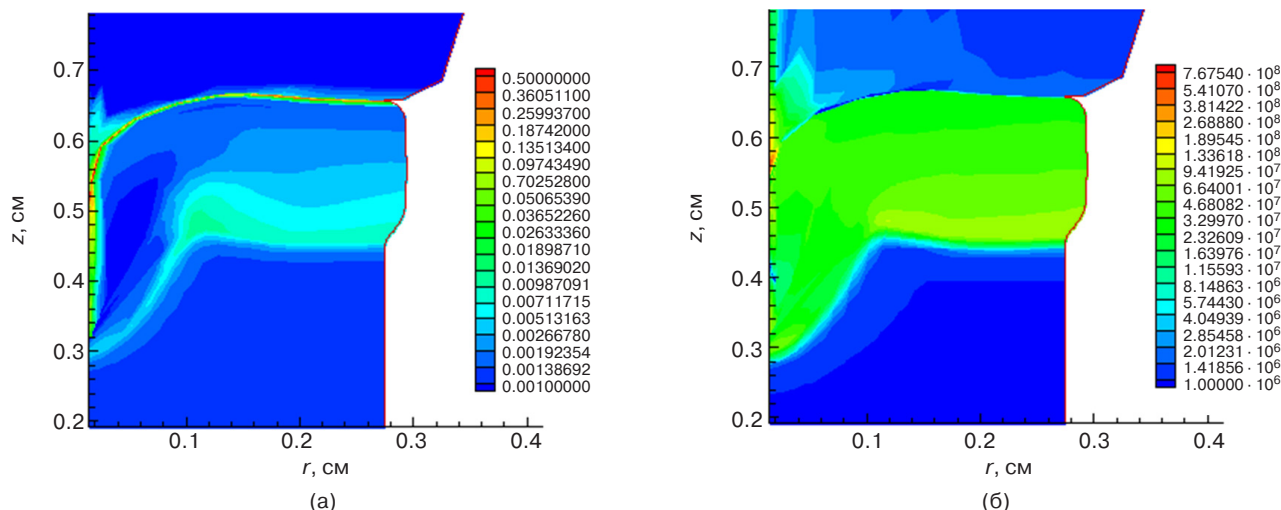


Рис. 4. Поля плотности (а) и давления (б) на момент времени $t = 1500$ нс

3. ДИНАМИКА УВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ КОРОНЫ И ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГИИ В ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСЕ

Была выполнена серия квазиодномерных расчетов для пленок с постоянной толщиной и однородной интенсивностью лазерных потоков. В этом случае использовались разностные сетки с заметно меньшим числом узлов в поперечном направлении (всего 5–7 узлов). Это позволило существенно сократить процессорное время расчетов. Рассмотрены два типа задач:

- 1) в вариантах Zvor1 разлет испаренного вещества полимерной пленки не был ограничен («открытая» корона). Суть в том, что на границе «вакуум–поршень» стоит условие $P_{out} = P_0$, где P_0 – начальное давление в поршне и газе внутри ЛУТ. В этом случае при поглощении лазерного потока давление резко возрастает, внешние слои поршня сублимируются и разлетаются со сверхзвуковой скоростью. В расчетах учитывалось отражение лазерных лучей от критической поверхности. Таким образом, каждый лазерный луч, распространяющийся строго вдоль оси Oz , дважды проходил плазменную корону.
- 2) в вариантах Zvor7 разлет вещества был ограничен прозрачной пластиной, расположенной с верхней стороны ЛУТ – откуда падает лазерный луч. Лазерный луч проходит через прозрачный слой и поглощается во внешних слоях полимерной пленки. В этом случае импульс, который передается в неиспаренные слои мишени, больше, чем в первом. Такой режим облучения будем называть «закрытой» короной.

На рис. 5а показано распространение фронта УВ $Z_{sw}(t)$ для пленки $d_0 = 5$ мкм и трех значений поглощенной лазерной энергии $E_{las} = 5$ Дж (Zvor1a), 10 Дж (Zvor1b) и 17.5 Дж (Zvor1c). На рис. 5б

для тех же условий показано движение контактной границы «Air–CH» $Z_b(t)$. Если кривая $Z_{sw}(t)$ на интервале времени $0.2 < t < 0.2$ выходит практически на постоянный наклон (т.е. скорость $V_{sw}(t) = const$), то кривая $Z_b(t)$ асимптотически стремится к постоянной величине, т.е. скорость $V_b(t) \rightarrow 0$. «Крестиками» отмечены значения пройденного УВ от времени $Z_{sw}(t)$, полученные в экспериментах на ЛУТ.

Замечание 1. На рис. 5 показаны значения $Z_{sw}(t)$, полученные в расчетах и в экспериментах на ЛУТ в ФИАН (отмечено «крестиками» на графике, подробнее в [20]). В экспериментах измерялась энергия лазерного пучка, которая вводится в мишенную камеру. Доля энергии, которая отражается и рассеивается в плазме, не измерялись. В расчетах закладывалась энергия лазерного импульса, которая распространяется в плазме и отражается от критической поверхности строго назад (рефракция лучей не учитывалась). Доля отраженной (reflected) лазерной энергии, вышедшей из плазмы (в процентах) $\varepsilon = (E_{ref}/E_{las}) \cdot 100\%$, составляла 50.7% (для варианта Zvor1a), $\varepsilon = 43.8$ (для варианта Zvor1b), $\varepsilon = 33\%$ (для варианта Zvor1c).

При плотности энергии лазерного излучения $\sim 10^9$ Вт/см² и площади фокуса ~ 0.5 см² формируется сравнительно короткая плазменная струя (т.е. ее протяженность меньше, чем поперечный размер фокусного пятна). Чем меньше поглощенная энергия, тем меньше протяженность плазменной короны и тем больше доля отраженной лазерной энергии.

Замечание 2. Физико-математическая модель программы *Atlant_C* не учитывает молекулярную диффузию и турбулентное перемешивание. Физико-математические модели турбулентного перемешивания и численные коды описаны в [2]. Учет этих процессов мог бы привести к размытию контактной границы и увеличению доли рассеянного лазерного потока.

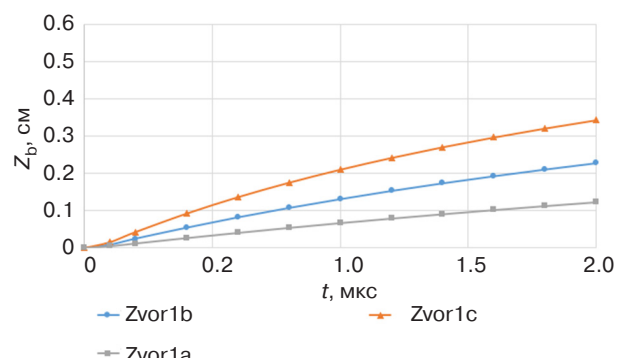
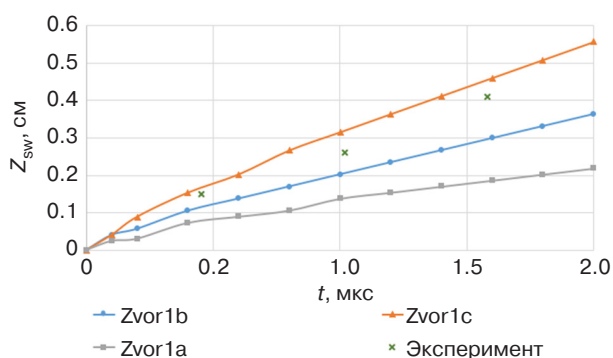


Рис. 5. Зависимость пути, пройденного УВ от времени $Z_{sw}(t)$:

(а) зависимость пути, пройденного контактной границей от времени $Z_b(t)$,

(б) вариант Zvor1a: $E_{las} = 5$ Дж, вариант Zvor1b: $E_{las} = 10$ Дж, вариант Zvor1c: $E_{las} = 17.5$ Дж

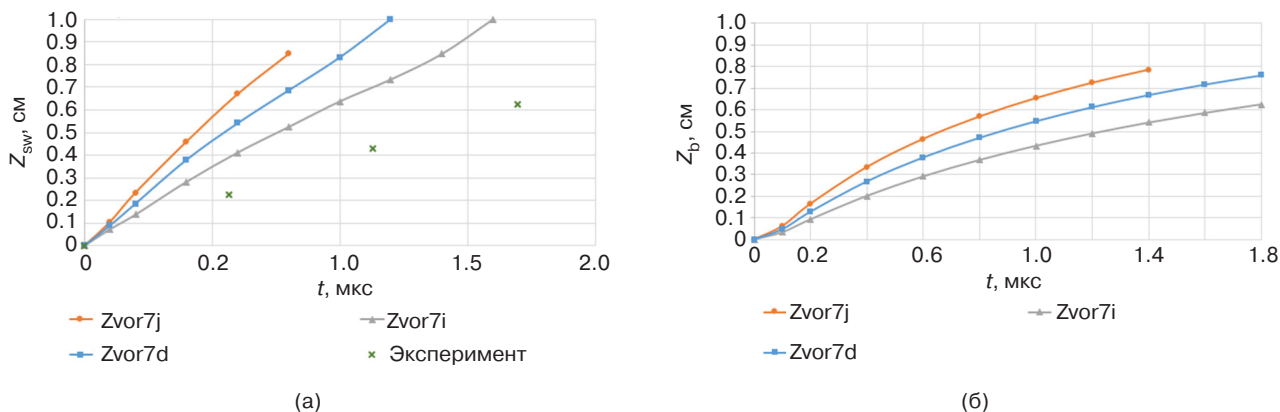


Рис. 6. Сравнения расстояний, пройденных УВ, $Z_{sw}(t)$ (а) и контактной границей $Z_b(t)$ (б) в случае «закрытой» короны для различных значений поглощенной лазерной энергии: вариант Zvor7i: $E_{las} = 5$ Дж, вариант Zvor7d: $E_{las} = 10$ Дж, вариант Zvor7j: $E_{las} = 17.5$ Дж

На рис. 6 представлены результаты сравнений расчетов пути, пройденного УВ $Z_{sw}(t)$ (рис. 6а) и контактной границы «пленка–воздух» $Z_b(t)$ (рис. 6б) в случае «закрытой» короны для пленок (поршня) с начальной толщиной $d_0 = 5$ мкм. «Крестиками» отмечены данные экспериментов из [20]. В этой серии расчетов («закрытая» корона) полагалось, что вся лазерная энергия, которая прошла прозрачную пластину, поглощается вблизи границы «внешний прозрачный слой–СН-пленка (поршень)».

Замечание 3. Физико-математическая постановка задачи в четвертой серии расчетов не учитывает отражение лазерного излучения из плазмы. Дело в том, что масса и толщина прозрачного слоя велики по сравнению с этими параметрами в пленке. Требуется разработка новой физико-математической модели, учитывающей прохождение мощного лазерного потока, диссоциацию и ионизацию атомов, рассеяние излучения на дефектах и трещинах, которые могли возникнуть при прохождении УВ в оргстекле. В расчетах, фактически, был использован дельтаобразный механизм поглощения вблизи контактной поверхности «пленка–оргстекло». Поэтому экспериментальные точки лежат ниже, чем расчетные.

Размер расчетной области $0 < z < 1$ см. В интервале времени $0 < t < 0.2$ мкс в газе вблизи контактной границы ($z \approx 1$ см) формируется УВ, причем в случае «закрытой» короны ускорение и скорость поршня после окончания лазерного импульса существенно больше, чем в случае «открытой». Когда УВ достигает нижнего торца расчетной области ($z = 0$), то она отражается. Поток воздуха за фронтом УВ тормозится у нижнего торца. Расчеты были сделаны до этого момента, поэтому в случае «закрытой» короны интервал времени $t \in [0, 2.0]$ мкс.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ И ВЫВОДЫ

В статье представлены результаты четырех серий расчетов, моделирующих распространение УВ в ЛУТ, где драйвером является мощный KrF-лазер с энергией до 100 Дж и длительностью импульса 100 нс.

В первой серии расчетов моделировалось распространение УВ в профилированной (в виде «ступеньки») мишени. Показано, что УВ, распространяющиеся в плотном слое в период действия лазерного импульса, приводят к выполаживанию контактной границы поршня и формированию плоского фронта УВ в газе.

Во второй серии расчетов изучалось влияние неоднородности облучения мишени на формирование УВ. Показано, что при наличии в лазерном импульсе спекла с интенсивностью, в несколько раз превосходящей среднюю плотность излучения, падающего на мишень, и энергией ~ 5 –10% от основного, формируется струя, которая может обгонять усредненный по фокальному пятну фронт УВ в газе и формировать поперечные УВ.

В третьей и четвертой сериях расчетов изучалась динамика УВ в газе в условиях «открытой» и «закрытой» короны (рис. 5 и 6). Полученные результаты сравнивались с данными экспериментов на ЛУТ. Проведены расчеты распространения УВ в ЛУТ при поглощенных энергиях лазерного импульса 5, 10 и 17.5 Дж и толщинах поршня 5 мкм. Скорость УВ в газе согласуется с данными натуральных экспериментов на ЛУТ [18] в режиме «открытой» плазменной короны. Для сравнения с данными экспериментов с «закрытой» короной требуется дальнейшее развитие физико-математической модели.

На основании изложенных результатов можно сделать следующие выводы:

1. С помощью ЛУТ в лабораторных условиях можно исследовать распространение гиперзвуковых УВ (с числами Маха ≥ 10 и скоростями потоков газа порядка первой (а в перспективе, возможно, второй и третьей) космических скоростей).
2. С помощью вычислительных экспериментов показано, что при использовании профилированной в виде «ступеньки» мишени-поршня происходит выполаживание контактной поверхности «поршень–газ», и далее распространяется УВ с почти плоским фронтом. Такая ситуация возникает в том случае, когда первая продольная волна проходит мишень за время много меньшее, чем длительность лазерного импульса.
3. Рассмотрен случай неоднородного нагрева мишени лазерным импульсом. В том случае, когда энергия спеклов мала по сравнению с энергией основного импульса (~1%) пленка СН ускоряется, как целое, и формирует почти плоский фронт УВ в газе.
4. В случае, когда энергия спекла составляет ≥ 5 –10% от энергии лазерного импульса, а его интенсивность заметно превосходит усредненное значение плотности потока в пятне, возможно разрушение слоя и формирование струй.
5. При лазерном нагреве мишени в режиме «закрытой» короны скорость распространения фронта УВ возрастает приблизительно на 40–50% (в рассмотренном случае).
6. В случае, когда пленка разрушается и фрагментируется, формируется турбулентный слой (с плотностью на 1–2 порядка величины больше, чем плотность газа в ЛУТ). Этот поршень формирует УВ в газе. Моделирование поглощения лазерного излучения и развития турбулентного слоя в процессе ускорения требует разработки новых физико-математических моделей и программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение особенностей развития гидродинамических неустойчивостей является важной актуальной задачей фундаментальной физики, а также в исследованиях по лазерному термоядерному синтезу и в астрофизике. Эти исследования требуют развития сложных физико-математических моделей и программ, проведения дорогостоящих уникальных по точности измерений, сравнения данных натуральных и вычислительных экспериментов. Лазерная ударная труба является перспективным инструментом таких исследований. В статье были представлены результаты вычислительных экспериментов на ЛУТ, сравнение с опубликованными данными экспериментов на ЛУТ, рассмотрены перспективы дальнейших исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках программы Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Газодинамика и физика взрыва», тема «Исследование физических процессов при УТС и в звездных системах».

ACKNOWLEDGMENTS

The work was conducted as part of the National Center for Physics and Mathematics (NCPM) program “Gas Dynamics and Explosion Physics,” topic “Investigation of Physical Processes at Fusion Power and in the Star Systems.”

Вклад авторов

И.Г. Лебо – развитие физико-математической модели и численного кода, постановка задач и проведение расчетов. Совместно с соавторами: анализ результатов расчетов, подготовка статьи к публикации.

В.А. Комарова, М.А. Рыжков – построение графиков, анализ результатов расчетов, подготовка статьи к публикации.

Authors' contributions

I.G. Lebo – design of the physicomathematical model and numerical code, problem statement and calculations.

V.A. Komarova, M.A. Ryzhkov – plotting, analyzing calculation results, and preparing the article for publication.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Н.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б. *Физика лазерного термоядерного синтеза*. М.: Знание; 1988, 176 с.
2. Невмержицкий Н.В., Разин А.Н., Козлов В.И. *Гидродинамические неустойчивости в мишенях инерциального термоядерного синтеза*: монография. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ; 2024, 416 с. ISBN 978-5-9515-0558-3
3. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Физматлит; 2008, 652 с. ISBN 978-5-9291-0938-3
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. *Гидродинамика*. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.; 1986, 736 с.
5. Лебо И.Г., Тишкин В.Ф. *Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза*. М.: Физматлит; 2006, 304 с. ISBN 5-9221-0683-X

6. Брагин М.Д., Гуськов С.Ю., Змитренко Н.В., Кучугов П.А., Лебо И.Г., Левкина Е.В., Невмержицкий Н.В., Синькова О.Г., Стаценко В.П., Тишкин В.Ф., Фарин И.Р., Янилкин Ю.В., Яхин Р.А. Экспериментальное и численное исследование динамики развития неустойчивости Рэлея – Тейлора при числах Атвуда близких к единице. *Математическое моделирование*. 2023;35(1):59–82. <https://doi.org/10.20948/mm-2023-01-05>, <https://elibrary.ru/qfskuw>
7. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R., et al. Direct drive inertial confinement fusion: A review. *Phys. Plasmas*. 2015;22(1):110501. <https://doi.org/10.1063/1.4934714>
8. Лебо И.Г. Численное моделирование экспериментов по взаимодействию мощных ультрафиолетовых импульсов с конденсированными мишенями. *Russian Technological Journal*. 2023;11(3):86–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-86-103>
9. Самарский А.А., Попов Ю.П. *Разностные методы решения задач газовой динамики*. М.: Наука; 1992, 422 с. ISBN 5-02-014577-7
10. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. *Метод крупных частиц в газовой динамике*. М.: Наука; 1982, 391 с. <https://elibrary.ru/xqocjj>
11. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. М.: Наука; 1976, 400 с.
12. Самарский А.А. *Теория разностных схем*. М.: Наука; 1990, 616 с. ISBN 5-02-014576-9
13. Лебо И.Г., Обручев И.В. Моделирование двумерных вихревых течений в цилиндрическом канале с помощью параллельных вычислений на суперкомпьютере. *Russian Technological Journal*. 2022;10(1):60–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-60-67>
14. Зворыкин В.Д., Лебо И.Г. Применение мощного KrF-лазера для исследования сверхзвуковых течений газа и развития гидродинамических неустойчивостей в слоистых средах. *Квантовая электроника*. 2000;30(6):540–544.
15. Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры*. М.: Физматлит; 2005, 316 с. ISBN 5-9221-0120-X
16. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Laser and Target Experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN. *Laser Part. Beams*. 1999;17(1):69-88. <https://doi.org/10.1017/S0263034699171064>
17. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Commun. Pure Appl. Math.* 1960;13(2): 297–319. <https://doi.org/10.1002/cpa.3160130207>
18. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. *Известия АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа*. 1969;5:151–158. URL: <https://mzg.ipmnet.ru/ru/get/1969/5/151-158>. Дата обращения 12.09.2025.
19. Алешин А.Н., Зайцев С.Г., Лазарева Е.В., Гамалий Е.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б. Исследование линейной, нелинейной и переходной стадий развития неустойчивости Рихтмайера – Мешкова. *Докл. АН СССР*. 1990;310(5):1105–1108.
20. Зворыкин В.Д. Динамика гиперзвуковых ударных волн, генерируемых при лазерном ускорении тонкопленочных мишеней в лазерной ударной трубе и в свободном пространстве. *Письма в ЖЭТФ*. 2025;122(5-6):344–350. <https://www.elibrary.ru/xuqtzo>

REFERENCES

1. Basov N.G., Lebo I.G., Rozanov V.B. *Fizika lazernogo termoyadernogo sinteza (Physics of Laser Thermonuclear Fusion)*. Moscow: Znaniye; 1988, 172 p. (In Russ.).
2. Nevmerzhitskii N.V., Razin A.N., Kozlov V.I. *Gidrodinamicheskie neustoiichivosti v mishenyakh inertsiyal'nogo termoyadernogo sinteza (Hydrodynamic Instabilities in Inertial Thermonuclear Fusion Targets)*: Monograph. Sarov; 2024, 416 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9515-0558-3
3. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavlenii (Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Effects)*. Moscow: Fizmatlit; 2008, 652 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9291-0938-3
4. Landau L.D., Lifshits E. *Gidrodinamika (Hydrodynamics)*. Moscow: Nauka; 1986, 736 p. (In Russ.).
5. Lebo I.G., Tishkin V.F. *Issledovanie gidrodinamicheskoi neustoiichivosti v zadachakh lazernogo termoyadernogo sinteza (Study of Hydrodynamic Instability in Laser Thermonuclear Fusion Problems)*. Moscow: Fizmatlit; 2006, 304 p. (In Russ.). ISBN 5-9221-0683-X
6. Bragin M.D., Gus'kov S.Y., Zmitrenko N.V., et al. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of Development of Rayleigh–Taylor Instability at Atwood Numbers Close to Unity. *Math. Models Comput. Simul.* 2023;15(4):660–676. <https://doi.org/10.1134/S2070048223040038>
[Original Russian Text: Bragin M.D., Gus'kov S.Yu., Zmitrenko N.V., Kuchugov P.A., Lebo I.G., Levkina E.V., Nevmerzhitskii N.V., Sin'kova O.G., Statsenko V.P., Tishkin V.F., Farin I.R., Yanilkin Yu.V., Yakhin R.A. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of Development of Rayleigh–Taylor Instability at Atwood Numbers Close to Unity. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2023;35(1):59–82 (in Russ.). <https://doi.org/10.20948/mm-2023-01-05>, <https://elibrary.ru/qfskuw>
7. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R., et al. Direct drive inertial confinement fusion: A review. *Phys. Plasmas*. 2015;22(1):110501. <https://doi.org/10.1063/1.4934714>
8. Lebo I.G. Mathematical modeling of experiments on the interaction of a high-power ultraviolet laser pulse with condensed targets. *Russian Technological Journal*. 2023;11(3):86–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-86-103>
9. Samarskii A.A., Popov Yu.P. *Raznostnye metody resheniya zadach gazovoi dinamiki (Difference Methods for Solving Problems of Gas Dynamics)*. Moscow: Nauka; 1992, 422 p. (In Russ.). ISBN 5-02-014577-7

10. Belotserkovskii O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoi dinamike (Large Particle Method in Gas Dynamics)*. Moscow: Nauka; 1982, 391 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xqocjj>
11. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.N., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoi dinamiki (Numerical Solution of Multidimensional Gas Dynamics Problems)*. Moscow: Nauka; 1976, 400 p. (In Russ.).
12. Samarskii A.A. *Teoriya raznostnykh skhem (Theory of Difference Schemes)*. Moscow: Nauka; 1990, 616 p. (In Russ.). ISBN 5-02-014576-9
13. Lebo I.G., Obruchev I.V. The modeling of two-dimensional vortex flows in a cylindrical channel using parallel calculations on a supercomputer. *Russian Technological Journal*. 2022;10(1):60–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-60-67>
14. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Application of a high power KrF laser for the study of supersonic gas flows and the development of hydrodynamic instability in layered media. *Quantum Electron*. 2000;30(6):540–544. <https://doi.org/10.1070/QE2000v030n06ABEH001761>
[Original Russian Text: Zvorykin V.D., Lebo I.G. Application of a high power KrF laser for the study of supersonic gas flows and the development of hydrodynamic instability in layered media. *Kvantovaya Elektronika*. 2000;30(6):540–544 (in Russ.).]
15. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery (Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples)*. Moscow: Fizmatlit; 2005, 316 p. (In Russ.). ISBN 5-9221-0120-X
16. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Laser and Target Experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN. *Laser Part. Beams*. 1999;17(1):69–88. <https://doi.org/10.1017/S0263034699171064>
17. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Commun. Pure Appl. Math*. 1960;13(2): 297–319. <https://doi.org/10.1002/cpa.3160130207>
18. Meshkov E.E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave. *Fluid Dyn*. 1969;4(5):101–104. <https://doi.org/10.1007/BF01015969>
[Original Russian Text: Meshkov E.E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Mekhanika zhidkosti i gaza*. 1969;5:151–158 (in Russ.). Available from URL: <https://mzg.ipmnet.ru/ru/get/1969/5/151-158>. Accessed September 12, 2025]
19. Aleshin A.N., Zaitsev C.G., Lazareva E.V., Gamalii E.G., Lebo I.G., Rozanov V.B. A study of linear, non-linear and transition stages of Richtmyer–Meshkov instability. *Dokl. Math*. 1990;35(2):177–180.
[Original Russian Text: Aleshin A.N., Zaitsev S.G., Lazareva E.V., Gamalii E.G., Lebo I.G., Rozanov V.B. A study of linear, non-linear and transition stages of Richtmyer–Meshkov instability. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1990;310(5):1105–1108 (in Russ.).]
20. Zvorykin V.D. Dynamics of Hypersonic Shock Waves Generated by Laser Acceleration of Thin-Film Targets in a Laser-Driven Shock Tube and Free Space. *JETP Lett*. 2025;122(6):354–360. <https://doi.org/10.1134/S002136402560805X>
[Original Russian Text: Zvorykin V.D. Dynamics of Hypersonic Shock Waves Generated by Laser Acceleration of Thin-Film Targets in a Laser-Driven Shock Tube and Free Space. *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. 2025;122(5-6):344–350 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/xuqtzo>]

Об авторах

Лебо Иван Германович, д.ф.-м.н., профессор, кафедра высшей математики, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lebo@mirea.ru. Scopus Author ID 7003412908, SPIN-код РИНЦ 9416-5542, <https://orcid.org/0000-0001-8341-9453>

Комарова Виктория Александровна, студент, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: viki.kom@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-3342-6636>

Рыжков Максим Анатольевич, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ryzhkov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5476-3273, <https://orcid.org/0009-0000-4475-0039>

About the Authors

Ivan G. Lebo, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Higher Mathematics, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lebo@mirea.ru. Scopus Author ID 7003412908, RSCI SPIN-code 9416-5542, <https://orcid.org/0000-0001-8341-9453>

Victoria A. Komarova, Student, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: viki.kom@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-3342-6636>

Maxim A. Ryzhkov, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ryzhkov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5476-3273, <https://orcid.org/0009-0000-4475-0039>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 519.95:621.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-124-133>
EDN DPUAHF



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ производительности и временных характеристик промышленных сетей со случайным и детерминированным эквидистантным распределением узлов

А.С. Леонтьев, Д.В. Жматов [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: zhmatov@mirea.ru

• Поступила: 21.10.2025 • Доработана: 20.11.2025 • Принята к опубликованию: 05.02.2026

Резюме

Цели. Цель работы – разработка математического аппарата для оценки производительности и вероятностно-временных характеристик процессов передачи пакетов в промышленных сетях, использующих метод случайного множественного доступа. Особенностью исследования является учет строгих ограничений на время доставки пакетов и влияние коллизий.

Методы. В основе исследования лежат методы теории случайных процессов. Для аналитического вывода ключевых соотношений и доказательства основной теоремы применяется аппарат преобразования Лапласа – Стильтеса.

Результаты. Сформулирована и доказана теорема, определяющая форму преобразования Лапласа – Стильтеса для функции распределения времени передачи пакета. Этот результат учитывает повторные передачи пакетов, вызванные конфликтами в среде с множественным доступом. Проведен анализ процессов передачи информации в промышленных сетях со случайным множественным доступом, включая изменение количества рабочих станций и интенсивности потоков пакетов. Анализировались пакеты, поступающие в узлы сети, оценивались производительность системы, степень загрузки узлов и канала передачи, а также время доставки пакетов с учетом возникающих конфликтов. Выявлено значительное различие во временных характеристиках передачи между центральными и периферийными узлами сети. Для автоматизации исследований и оценки различных режимов работы сети при ее масштабировании и увеличении нагрузки на узлы разработан и реализован программный комплекс.

Выводы. При проведении исследования промышленных сетей со случайным множественным доступом выявлено, что при масштабировании сети с увеличением количества узлов возрастает производительность сети, однако при значительном увеличении загрузки узлов и передающей среды производительность падает. Загрузка крайних узлов и время передачи пакетов из-за повышенного возрастания конфликтов возрастают значительно быстрее по сравнению с центральными узлами. Производительность и временные характеристики при увеличении количества узлов несущественно зависят от типа распределения узлов – случайного или детерминированного эквидистантного. Для обеспечения сбалансированности режимов работы промышленной сети со случайным множественным доступом предлагается на 10–15% уменьшить нагрузку на крайние узлы. При этом можно обеспечить примерно одинаковую загрузку передающей среды и узлов при увеличении их количества.

Ключевые слова: промышленная сеть, производительность, временные характеристики, преобразование Лапласа – Стилтеса, множественный доступ, масштабирование

Для цитирования: Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Анализ производительности и временных характеристик промышленных сетей со случайным и детерминированным эквидистантным распределением узлов. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):124–133. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-124-133>, <https://www.elibrary.ru/DPUAHF>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Performance analysis and timing characteristics in industrial networks with random and deterministic node distributions

Alexander S. Leontyev, Dmitry V. Zhmatov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: zhmatov@mirea.ru

• Submitted: 21.10.2025 • Revised: 20.11.2025 • Accepted: 05.02.2026

Abstract

Objectives. The aim of the study was to develop mathematical tools to assess the performance and probabilistic-temporal characteristics of packet transmission processes in industrial networks employing random multiple access. Our study specifically examined strict packet delivery time constraints and the impact of collisions.

Methods. The research applies methods from the theory of random processes. We used the Laplace–Stieltjes transform to derive key relationships analytically and prove the main theorem.

Results. We formulated and proved a theorem which defines the Laplace–Stieltjes transform for the packet transmission time distribution function. The result incorporates packet retransmissions caused by conflicts in the multiple access environment. We analyzed information transmission processes in industrial networks with random multiple access, considering variations in the number of workstations and packet flow intensities at network nodes. Our evaluation included throughput, node and transmission medium utilization, and packet transmission times under collision conditions. The results reveal significant differences in the temporal characteristics of packet transmission between central and edge nodes. We developed and implemented a software package, in order to automate the study and evaluate various network operating modes during scaling and under increased nodal load.

Conclusions. The study of industrial networks with random multiple access established that while network throughput increases with the number of nodes during scaling, it degrades under significantly high node and transmission medium utilization. The utilization of edge nodes and their packet delivery times increase markedly faster than those of central nodes. This is due to a higher collision rate. As the network size increases, the performance and temporal characteristics exhibit only marginal dependence on the node distribution type: random or deterministic equidistant. In order to ensure balanced operation in an industrial network with random multiple access, we propose reducing the load on edge nodes by 10–15%. This strategy can maintain approximately uniform utilization of both the transmission medium and the nodes as their number increases.

Keywords: industrial network, performance, temporal characteristics, Laplace–Stieltjes transform, multiple access, scalability

For citation: Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Performance analysis and timing characteristics in industrial networks with random and deterministic node distributions. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):124–133. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-124-133>, <https://www.elibrary.ru/DPUAHF>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

При анализе эффективности функционирования промышленных сетей связи необходимо учитывать особенности процессов передачи данных, происходящих на первых трех уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (open systems interconnection, OSI). Именно эти уровни определяют корректность формирования кадров, адресацию, контроль ошибок и обеспечение физического канала передачи информации.

Одним из ключевых требований, предъявляемых к промышленным сетям, интегрированным в состав автоматизированных систем управления различного назначения, является ограничение по времени доставки данных. Соблюдение этого параметра имеет решающее значение для поддержания требуемых временных показателей технологических процессов и обеспечения стабильного функционирования распределенных систем управления.

Для оценки производительности и вероятностно-временных характеристик процессов передачи данных была исследована промышленная сеть, в которой реализован метод множественного доступа с прослушиванием несущей и обнаружением коллизий (carrier sense multiple access with collision detection, CSMA/CD). Данный метод обеспечивает организацию совместного доступа нескольких узлов к общей передающей среде за счет предварительного контроля состояния канала и прекращения передачи при обнаружении конфликта сигналов. Пропускная способность канала передачи данных в рамках моделирования принималась равной $C = 1$ Гбит/с, что соответствует характеристикам типовых проводных промышленных сетей стандарта Ethernet.

В ходе анализа изучались зависимости исследуемых параметров от количества узлов сети как для периферийных, так и для центральных элементов. Дополнительно рассматривались различия между вариантами случайного распределения узлов вдоль линии связи и их равномерного (эквидистантного) размещения.

1. ТЕОРЕМА О ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЛАПЛАСА – СТИЛТЬЕСА ДЛЯ ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТА

В качестве интегрального показателя эффективности промышленной сети, аналогично подходу, предложенному в работе [1], использовалась суммарная интенсивность потока данных, своевременно обработанного всеми узлами системы:

$$\lambda_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Q_i, \quad (1)$$

где Q_i – вероятность своевременной доставки пакетов, поступающих из i -го узла; λ_i – интенсивность пакетов, поступающих в i -й узел.

Как показано в работе [1], вероятность того, что при обслуживании пакета, поступившего в k -й узел, не возникнет конфликтов, оценивается с помощью формулы:

$$q_k = \prod_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N e^{-\lambda_n} 2^{\frac{L_{nk}}{V_c}}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где N – количество узлов в сети, L_{nk} – расстояние между k -м и n -м узлами сети, V_c – скорость распространения сигнала в передающей среде.

Вероятность P_n того, что пакет, поступивший в k -й узел, будет передан ровно за n попыток (т.е. при передаче возникнет $(n - 1)$ конфликт), равна:

$$P_n = (1 - q_k)^{n-1} q_k. \quad (3)$$

На основании полученных ранее А.С. Леонтьевым и опубликованных впервые в 2001 г. оригинальных результатов по разработке математических методов исследования локальных сетей [1], можно сформулировать следующую теорему:

Теорема. Преобразование Лапласа – Стилтеса $Z_k^*(s)$ функции распределения времени передачи пакета из k -го узла с учетом возникающих конфликтов определяется выражением:

$$Z_k^*(s) = q_k T^*(s) \frac{1}{1 - (1 - q_k) X^*(s) V_k^*(s)}, \quad (4)$$

где $V_k^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dV_k(t)$ – функция распределения времени разрешения конфликта пакета, идущего из k -го узла; $X^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dX(t)$; $X(t)$ – функция распределения времени задержки перед повторной передачей пакета при возникновении конфликта; $T^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dT(t)$; $T(t)$ – функция распределения времени передачи пакета без конфликта.

Доказательство. Вывод формулы преобразования Лапласа – Стильтеса для функции распределения времени передачи пакета с учетом возможных конфликтов.

Преобразование Лапласа – Стильтеса для функции $F(t)$, у которой производная равна $F'(t) = f(t)$, определяется следующим образом:

$$F^*(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt.$$

Преобразование Лапласа – Стильтеса характеризуется свойством мультипликативности [2–6]: если случайные величины $\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N$ независимы и имеют функции распределения $F_i(t)$, то преобразование Лапласа – Стильтеса для суммарной функции распределения определяется как произведение преобразований отдельных функций:

$$F_{\Sigma}^*(s) = F_1^*(s) \cdot F_2^*(s) \cdot \dots \cdot F_N^*(s).$$

Применим эти данные для вывода функциональных соотношений времени передачи пакетов в промышленных сетях. Обозначим через P_n вероятность того, что пакет будет успешно передан именно с n -й попытки. В этом случае время передачи пакета при n попытках можно выразить следующим образом:

$$\xi_{\text{пер}(n)} = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_{n-1} + \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_{n-1} + T_{\text{пер}} = \sum_{i=1}^{n-1} \xi_i + \sum_{i=1}^{n-1} \eta_i + T_{\text{пер}},$$

где ξ_i – время разрешения i -го конфликта; $\sum_{i=1}^{n-1} \xi_i$ – общее время разрешения $(n-1)$ конфликтов; η_i – время задержки перед повторной передачей пакета при возникновении i -го конфликта; $\sum_{i=1}^{n-1} \eta_i$ – общее время задержки при возникновении $(n-1)$ конфликтов; $T_{\text{пер}}$ – время передачи пакета (n -я попытка).

Если все ξ имеют одну и ту же функцию распределения $V(t)$, а все η – одну и ту же функцию распределения $X(t)$, то преобразование Лапласа – Стильтеса функции распределения времени передачи пакета ровно за n попыток примет вид:

$$B_n^*(s) = (V_k^*(s))^{n-1} (X^*(s))^{n-1} T^*(s).$$

Преобразование Лапласа – Стильтеса функции распределения времени передачи пакета из k -го узла с учетом возникающих конфликтов будет определяться выражением:

$$Z_k^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n B_n^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} [P_n (X^*(s))^{n-1} (V_k^*(s))^{n-1} T^*(s)], \quad (5)$$

$$Z_k^*(s) = \sum_{n=1}^{\infty} (1 - q_k)^{n-1} q_k (X^*(s))^{n-1} (V_k^*(s))^{n-1} T^*(s) = (6) = q_k T^*(s) \frac{1}{1 - (1 - q_k) X^*(s) V_k^*(s)},$$

где $q_k T^*(s)$ – первый член, а $(1 - q_k) X^*(s) V_k^*(s)$ – знаменатель бесконечно убывающей геометрической прогрессии. Выражение (6) совпадает с формулой (4), что и доказывает теорему.

Продифференцировав полученное выражение по s , получим выражения для моментов $Z_k^{(1)}$ и $Z_k^{(2)}$ функции распределения, $Z_k(t)$, $B_k^{(1)}$, $B_k^{(2)}$, с помощью которых можно вывести функциональные соотношения времени передачи пакетов в сетях [1, 2, 7].

При моделировании длина сети принималась равной 500 и 1000 м соответственно. Распределение узлов в сети может быть детерминированным с равными интервалами или случайным. В случае случайного распределения позиции узлов задавались произвольно [8–16].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ

В процессе моделирования принята пропускная способность канала связи $C = 1$ Гбит/с, а скорость распространения электромагнитного сигнала по линии составила $V_c = 2.9 \cdot 10^8$ м/с. При этом максимальная задержка повторной передачи при обнаружении коллизий (наложения пакетов, передаваемых одновременно) составила $\tau = 0.0005$ с. Для имитации помехового воздействия использовался пакет длиной $L_{\text{пом}} = 36$ бит, директивное время передачи одного пакета принималось

равным $T_{дир}^{(1)} = 0.001$ с, а длина передаваемого пакета $L_{пак} = 4096$ бит, Интенсивность поступления данных в узлы моделируемой сети (λ_n) изменялась от 1200 до 1800 пак/с при межкадровом интервале $\Delta t = 0.0005$ с.

Полученные результаты численного эксперимента отражены на рис. 1–7. Из анализа зависимостей (рис. 1) следует, что при увеличении количества сетевых узлов и их случайном размещении по длине линии связи $L_{сети} = 500$ м, а также при интенсивности потока $\lambda_n = 1800$ пак/с, $N = 1,110$, достигается равномерная загрузка ρ центральных участков сети и передающего канала. В то же время пограничные узлы демонстрируют более высокий уровень загрузки, превышающий среднее значение примерно на 10–15%. Это связано с увеличением вероятности конфликтов пакетов на границах сети, где чаще фиксируются взаимные интерференции. Полученные результаты подтверждают влияние геометрического расположения узлов и топологических особенностей сети на эффективность функционирования канала передачи данных. Это приводит к существенному увеличению времени передачи пакетов из крайних узлов при масштабировании сети из-за большой загрузки крайних узлов. Отметим, что загрузка остается практически такой же и при детерминированном эквидистантном распределении узлов по длине сети.

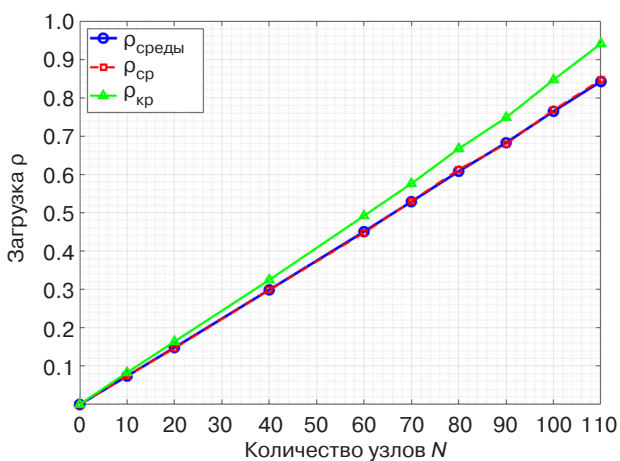


Рис. 1. Загрузки передающей среды ($\rho_{среды}$), крайнего ($\rho_{кр}$) и среднего ($\rho_{ср}$) узлов при случайном распределении узлов в сети

На рис. 2 представлена зависимость времени передачи пакетов от числа узлов сети N при интенсивности поступления пакетов $\lambda_n = 1800$ пак/с, где сравнивается время доставки из среднего и крайнего узлов для двух схем распределения узлов – случайной и детерминированной эквидистантной – и показано влияние топологии сети и расположения узлов на характеристики доставки.

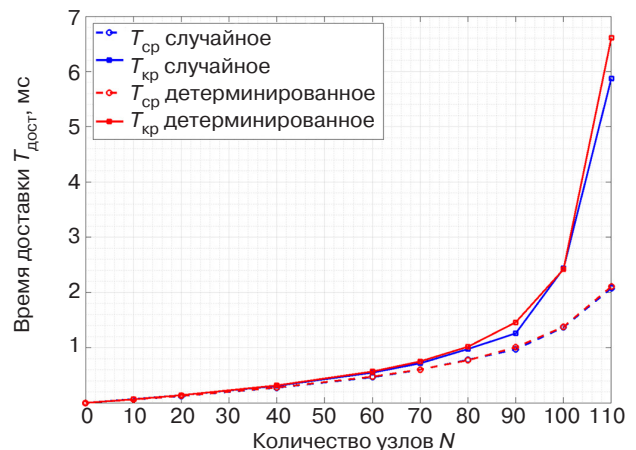


Рис. 2. Время доставки пакетов, поступающих из среднего ($T_{ср}$) и крайнего ($T_{кр}$) узлов при случайном и детерминированном эквидистантном распределении

Среднее время доставки пакетов, поступающих из крайних узлов, при большом количестве узлов (соответственно и при их высокой загрузке) может в несколько раз превышать среднее время доставки пакетов, поступающих из средних узлов, как при случайном, так и при детерминированном эквидистантном распределении узлов. Отметим, что временные характеристики передачи пакетов при их случайном и детерминированном эквидистантном размещении отличаются при масштабировании сети несущественным образом.

На рис. 3 показано, как вероятность своевременной доставки пакетов Q зависит от общего количества узлов N в сети. Анализ проведен отдельно для пакетов, поступающих от средних и крайних узлов, при интенсивности генерации трафика $\lambda_n = 1800$ пак/с на каждом узле. График позволяет сравнить, как различные схемы распределения узлов – случайная и детерминированная эквидистантная – влияют на гарантии своевременной доставки для разных категорий узлов при масштабировании сети. При масштабировании сети (увеличении количества узлов) вероятность своевременной доставки пакетов резко падает. Это падение более выражено для крайних узлов сети. Характер распределения узлов сети (случайный или детерминированный эквидистантный) в меньшей степени влияет на вероятность своевременной доставки пакетов.

На рис. 4 представлена зависимость производительности сети λ_{tot} от общего количества узлов N . Исследование проводилось для постоянной интенсивности генерации пакетов каждым узлом, составляющей $\lambda_n = 1800$ пак/с, $N = 1,110$. График позволяет сравнить влияние топологии сети (случайное и детерминированное эквидистантное распределение узлов) на пропускную способность. Анализ кривых показывает, как масштабирование сети сказывается

на ее общей производительности при разных принципах организации.

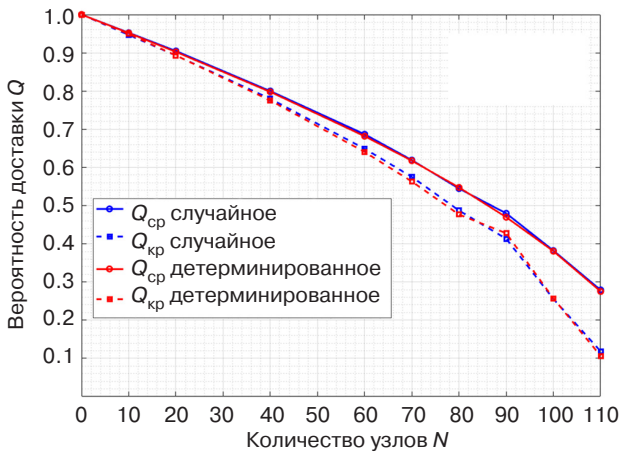


Рис. 3. Вероятность своевременной доставки пакетов, поступающих из среднего ($Q_{ср}$) и крайнего ($Q_{кр}$) узлов при случайном и детерминированном эквидистантном распределении узлов

Как видно из рис. 4, тип распределения узлов (случайный или детерминированный) несущественно влияет на производительность. При масштабировании сети с увеличением количества узлов производительность сначала возрастает, потом достигает максимума и резко падает. Это связано с тем, что с увеличением количества узлов возрастают загрузки узлов и передающей среды, резко возрастает время передачи пакетов и соответственно снижается вероятность обработки пакетов за время, не превышающее директивное. Это приводит к снижению производительности.

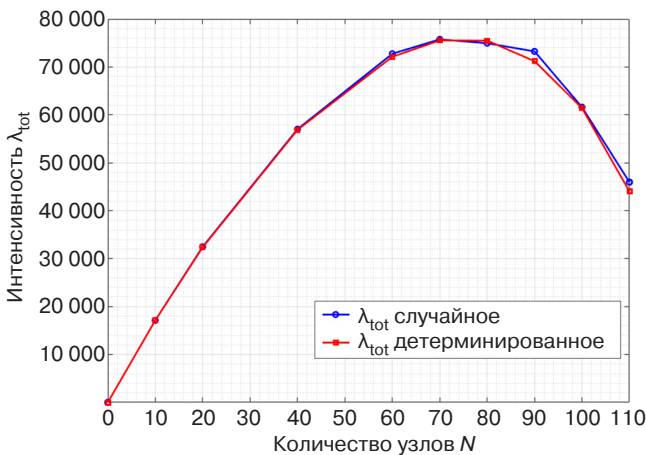


Рис. 4. Производительность сети при случайном и детерминированном эквидистантном распределении узлов сети

Рис. 5–7 демонстрируют, как изменяются основные характеристики промышленной сети со случайным множественным доступом при масштабировании в том случае, когда уменьшается интенсивность

пакетов, поступающих в узлы сети, до $\lambda_n = 1200$ пак/с, $N = 1,110$.

На рис. 5 показано, как количество узлов N в сети влияет на загрузку ее ключевых элементов: передающей среды, а также крайних и средних узлов. Данные получены для двух сценариев топологии – с детерминированным и случайным расположением узлов, при интенсивности входящего трафика $\lambda_n = 1200$ пак/с на каждом узле. Графики показывают, что загрузка узлов и передающей среды несущественно зависит от типа распределения узлов, но существенно зависят от длины сети. Как видно из графиков, загрузка передающей среды возрастает значительно быстрее, чем загрузка узлов. В то же время при сниженной интенсивности входящего потока пакетов рост загрузки как узлов, так и передающей среды происходит значительно медленнее по мере увеличения масштабов сети. Это указывает на более устойчивое функционирование системы при умеренных нагрузках. Максимальные значения загрузки каналов передачи и сетевых узлов, учитывающие влияние возникающих коллизий, достигаются лишь при большем общем количестве активных элементов сети, что подтверждает зависимость эффективности работы системы от плотности ее топологической структуры и интенсивности трафика. В частности, в данном случае критическое количество узлов N равно 190, в то время как при $\lambda_n = 1800$ пак/с критическое значение $N = 110$ (рис. 1).

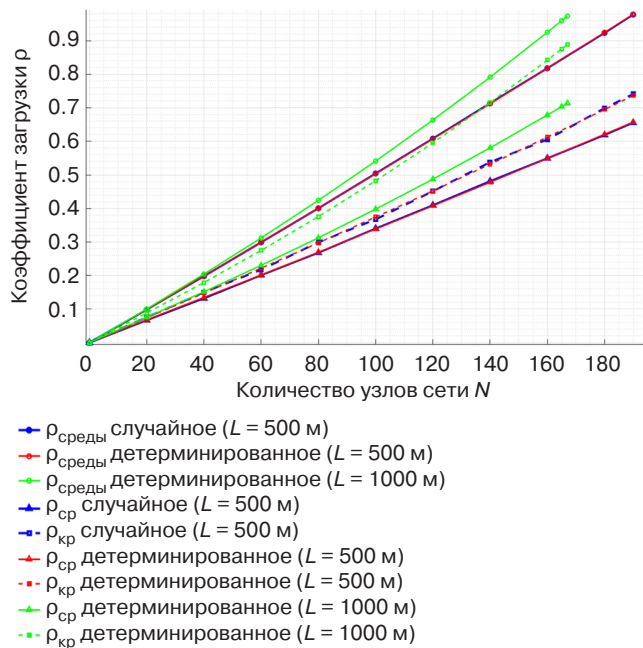


Рис. 5. Зависимость загрузки передающей среды ($\rho_{среды}$), крайнего ($\rho_{кр}$) и среднего ($\rho_{ср}$) узлов сети при детерминированном и случайном распределении узлов при различной длине сети

На рис. 6 показано влияние общего количества сетевых узлов N на величину времени доставки пакетов $T_{\text{достав}}$. Зависимость проанализирована отдельно для пакетов, сгенерированных узлами, расположенными на границе сети, и узлами, находящимися в ее центре. Во всех экспериментах интенсивность нагрузки, создаваемой каждым узлом, была фиксированной и равнялась $\lambda_i = 1200$ пак/с. График позволяет оценить, как выбор топологии сети – детерминированное или случайное распределение узлов – влияет на задержки передачи данных при изменении масштаба системы.

Как видно из графиков, тип распределения узлов (случайный или детерминированный) несущественно влияет на временные характеристики при масштабировании сети. В критической области функционирования ($N = 190$) время передачи пакетов существенно меньше, чем в критической области функционирования при интенсивности поступления пакетов $\lambda_n = 1800$ пак/с, $n = 1, N$. Установлено, что критическое значение числа узлов сети составляет $N = 110$. При достижении этого порога наблюдается переход системы в режим насыщения, характеризующийся изменением соотношения между нагрузкой на узлы и на канал передачи данных. Анализ полученных зависимостей (рис. 2 и 6) показал, что при перегрузке передающей среды различие во временных характеристиках передачи пакетов между периферийными и центральными узлами существенно меньше, чем в случае перегрузки крайних узлов сети. Это свидетельствует о том, что при высоких нагрузках канал передачи данных становится определяющим фактором, выравнивающим задержки по всей длине сети. Отсюда следует вывод, что при масштабировании промышленной сети следует соблюдать принцип сбалансированности, т.е. загрузка среды передачи и загрузка узлов должны меняться с учетом возникающих конфликтов примерно одинаково. Для этого необходимо не только выбрать интенсивности потоков, поступающих в узлы, таким образом, чтобы загрузка центральных узлов соответствовала загрузке передающей среды, но и на 10–15% снизить интенсивность потоков пакетов, поступающих на обработку из крайних узлов, по сравнению с центральными узлами.

Согласно данным рис. 7, производительность λ_{tot} промышленной сети демонстрирует ожидаемую зависимость от масштаба – она снижается с ростом количества узлов N . Однако ключевым результатом является то, что тип топологии (как случайное, так и детерминированное эквидистантное распределение узлов) не оказывает существенного влияния на величину производительности. Этот вывод подтверждается

графиками, построенными для интенсивности входящего трафика $\lambda_n = 1200$ пак/с, и указывает на доминирующую роль общего числа узлов, а не их пространственного расположения, в формировании пропускной способности сети.

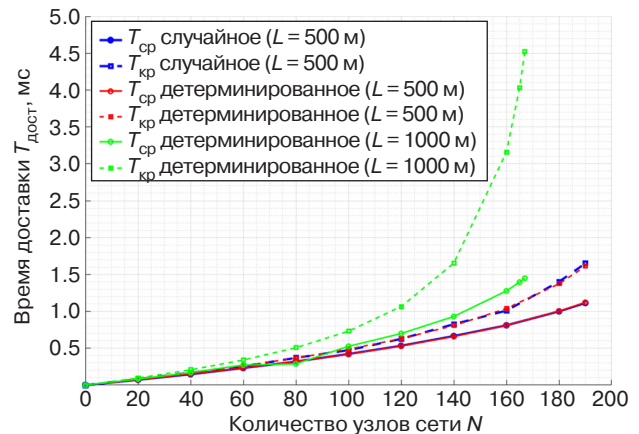


Рис. 6. Время доставки пакетов, поступающих из среднего ($T_{\text{ср}}$) и крайнего ($T_{\text{кр}}$) узлов при случайном и детерминированном распределении узлов при различной длине сети

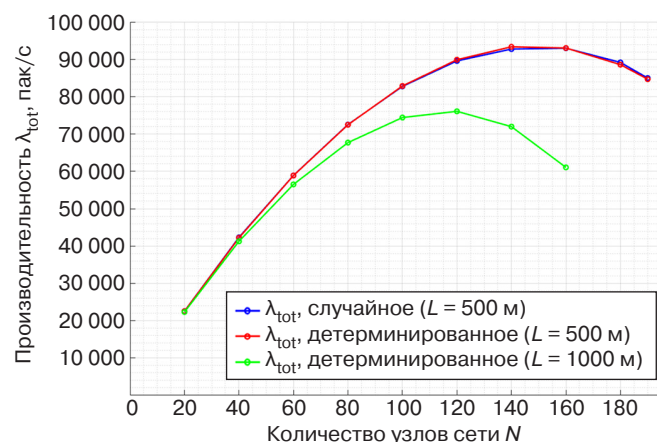


Рис. 7. Производительность сети λ_{tot} при случайном и детерминированном эквидистантном распределении узлов сети при различной длине сети и интенсивности поступления пакетов в узлы сети $\lambda_i = 1200$ пак/с, $i = 1, N$

Падение производительности в критической области функционирования, обусловленное большой загрузкой передающей среды, при $N = 160$ – 190 (рис. 7) выражено значительно слабее, чем в критической области, обусловленной большой загрузкой крайних узлов при $N = 90$ – 110 (рис. 4). Это обусловлено тем, что временные характеристики передачи пакетов с учетом возникающих конфликтов возрастают более резко при большой загрузке крайних узлов (рис. 2) по сравнению с большой загрузкой передающей среды (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка производительности и вероятностно-временных характеристик промышленных сетей со случайным множественным доступом с учетом ограничений на время передачи пакетов. Сформулирована и доказана теорема о преобразовании Лапласа – Стилтеса функции распределения времени передачи пакетов с учетом возникающих конфликтов.

Проведен анализ процессов передачи информации в промышленных сетях со случайным множественным доступом, включая изменение количества рабочих станций и интенсивности потоков пакетов, поступающих в узлы сети. Для автоматизации исследований и оценки различных режимов работы сети при ее масштабировании и увеличении нагрузки на узлы разработан и реализован комплекс программ.

Проведенное моделирование показало, что на начальных этапах масштабирования сети, сопровождающихся увеличением числа активных узлов, наблюдается рост ее общей производительности за счет более эффективного использования доступной пропускной способности канала. Однако при дальнейшем увеличении интенсивности трафика и загрузки как узлов, так и передающей среды, производительность системы начинает снижаться. При этом наблюдается резкое возрастание задержек при передаче пакетов, что свидетельствует о снижении эффективности обмена данными при высокой плотности сетевого трафика. Дополнительно установлено, что узлы, расположенные на периферии сети, характеризуются более быстрым

ростом времени передачи пакетов и уровня загрузки по сравнению с центральными элементами топологии. Это обусловлено увеличением вероятности коллизий и интерференции сигналов, возникающих вследствие одновременных попыток передачи данных на граничных участках сети.

Проведенные исследования показали, что производительность и временные характеристики с учетом возникающих конфликтов при увеличении количества узлов несущественно зависят от типа распределения узлов – случайного или детерминированного эквидистантного, однако существенно зависят от длины сети. Показано, что временные характеристики передачи пакетов с учетом возникающих конфликтов возрастают более резко при большой загрузке крайних узлов по сравнению с большой загрузкой передающей среды.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что при масштабировании промышленной сети следует соблюдать принцип сбалансированности, т.е. загрузка среды передачи и загрузка узлов должны меняться с учетом возникающих конфликтов примерно одинаково. Для этого необходимо не только выбрать интенсивности потоков, поступающих в узлы, таким образом, чтобы загрузка центральных узлов соответствовала загрузке передающей среды, но и на 10–15% снизить интенсивность потоков пакетов, поступающих на обработку из крайних узлов, по сравнению с центральными узлами.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors contributed equally to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жматов Д.В., Леонтьев А.С. Анализ процессов передачи информации в многомодовых оптоволоконных сетях с маркерным методом доступа. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>
2. Леонтьев А.С. Разработка аналитических методов, моделей и методик анализа локальных вычислительных сетей. *Теоретические вопросы программного обеспечения: Межвузовский сборник научных трудов*. М.: МИРЭА; 2001. С. 70–94.
3. Леонтьев А.С., Жматов Д.В. Исследование вероятностно-временных характеристик беспроводных сетей с методом доступа CSMA/CA. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):67–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76>
4. Ferguson C., Kleinrock L. Optimal Update Times for Stale Information Metrics Including the Age of Information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
5. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *GLOBECOM 2022 – 2022 IEEE Global Communications Conference*. Rio de Janeiro, Brazil. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
6. Sapna, Sharma M. Performance evaluation of a wired network with & without Load Balancer and Firewall. In: *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*. Kyoto, Japan. 2010. P. V2-515–V2-519. <https://doi.org/10.1109/ICEIE.2010.5559755>

7. Смирнова Е.В. *Технологии современных сетей Ethernet. Методы коммутации и управления потоками данных*. М.: БХВ-Петербург; 2017, 480 с.
8. Иваничкина Л.В., Непорада А.Л. Модель надежности распределенной системы хранения данных в условиях явных и скрытых дисковых сбоев. *Труды Института системного программирования РАН*. 2015;27(6):253–274. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27\(6\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-16)
9. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590088>
10. Альшаев И.А., Лаврухин В.А. О проектировании и оптимизации сетей Wi-Fi. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016;4(1):87–95. <https://www.elibrary.ru/wbdxht>
11. Звонарева Г.А., Бузунов Д.С. Использование имитационного моделирования для оценки временных характеристик распределенной вычислительной системы. *Открытое образование*. 2022;26(5):32–39. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2022-5-32-39>
12. Талалаев А.А., Фроленко В.П. Отказоустойчивая система организации высокопроизводительных вычислений для решения задач обработки потоков данных. *Программные системы: Теория и приложения*. 2018;9(1-36):85–108. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-1-85-108>
13. Павский В.А., Павский К.В. Математическая модель для расчета показателей надежности масштабируемых вычислительных систем с учетом времени переключения. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2020;2(212):134–145. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>
14. Ahmed W., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. System Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
15. Бахарева Н.Ф. Анализ производительности сетевых структур методами теории массового обслуживания. *Информатика, телекоммуникации и управление*. 2009;3(80):25–34. <https://www.elibrary.ru/kxxbqv>
16. Шарафуллина А.Ю., Галямов Р.Р., Зарипова Р.С. Технические принципы создания беспроводной локальной сети Wi-Fi. *T-Comm: Телекоммуникация и транспорт*. 2021;15(7):28–33. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-7-28-33>

REFERENCES

1. Zhmatov D.V., Leontyev A.S. Analysis of information transmission processes in multimode fiber-optic networks with a token-based access method. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-41-50>
2. Leontyev A.S. Development of Analytical Methods, Models, and Techniques for Local Area Networks Analysis. In: *Theoretical Issues of Software Engineering: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Moscow: MIREA; 2001. P. 70–94 (in Russ.).
3. Leontyev A.S., Zhmatov D.V. Study of the probabilistic and temporal characteristics of wireless networks using the CSMA/CA access method. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):67–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-67-76>
4. Ferguson C., Kleinrock L. Optimal Update Times for Stale Information Metrics Including the Age of Information. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*. 2023;4:734–746. <https://doi.org/10.1109/JSAIT.2023.3344760>
5. He Z., Kleinrock L. Optimization of Assisted Search Over Server-Mediated Peer-to-peer Networks. In: *GLOBECOM 2022 – 2022 IEEE Global Communications Conference*. Rio de Janeiro, Brazil. 2022. P. 4928–4934. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000846>
6. Sapna, Sharma M. Performance evaluation of a wired network with & without Load Balancer and Firewall. In: *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*. Kyoto, Japan. 2010. P. V2-515–V2-519. <https://doi.org/10.1109/ICEIE.2010.5559755>
7. Smirnova E.V. *Tekhnologii sovremennykh setei Ethernet. Metody kommutatsii i upravleniya potokami dannykh (Technologies of Modern Ethernet Networks. Methods of Switching and Data Flow Control)*. Moscow: BHV-Peterburg; 2017, 480 p. (in Russ.).
8. Ivaniichkina L.V., Neporada A.L. The reliability model of a distributed data storage in case of explicit and latent disk faults. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2015;27(6):253–274 (in Russ.). [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27\(6\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-16)
9. Wei M., Chen Z. Study of LANs access technologies in wind power system. In: *IEEE PES General Meeting*. Minneapolis, MN, USA. 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590088>
10. Alshaev I.A., Lavrukhin V.A. Wi-Fi networks design and optimization. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Telecom IT*. 2016;4(1):87–95 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wbdxht>
11. Zvonareva G.A., Buzunov D.S. Using Simulation Modeling to Estimate Time Characteristics of a Distributed Computing System. *Otkrytoe obrazovanie = Open Education*. 2022;26(5):32–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2022-5-32-39>
12. Talalaev A.A., Frolenko V.P. Fault-tolerant system for organizing high-performance computing for solving data stream processing problems. *Programmnye sistemy: Teoriya i prilozheniya = Program Systems: Theory and Applications*. 2018;9(1-36): 85–108 (in Russ.). <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2018-9-1-85-108>
13. Pavsky V.A., Pavsky K.V. Mathematical Model for Calculating Reliability Indicators of Scalable Computer Systems Considering Switching Time. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2020;2(212):134–145 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-134-145>

14. Ahmed W., Wu Y.W. A survey on reliability in distributed systems. *J. Comput. System Sci.* 2013;79(8):1243–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2013.02.006>
15. Bakhareva N.F. Performance analysis of network structures by methods of queuing theory. *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie = Computing, Telecommunication and Control.* 2009;3(80):25–34 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/kxxbqv>
16. Sharafullina A.Yu., Galyamov R.R., Zaripova R.S. Technical principles for creating a wireless local network Wi-Fi. *T-Comm: Telekommunikatsiya i transport = T-Comm.* 2021;15(7):28–33 (in Russ.). <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-7-28-33>

Об авторах

Леонтьев Александр Савельевич, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент, кафедра математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: leontev@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5798-9721, <https://orcid.org/0000-0003-3673-2468>

Жматов Дмитрий Владимирович, к.т.н., доцент, кафедра математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zhmatov@mirea.ru. Scopus Author ID 56825948100, SPIN-код РИНЦ 2641-6783, <https://orcid.org/0000-0002-7192-2446>

About the Authors

Alexander S. Leontyev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor, Department of Mathematical Support and Standardization, Institute of Information Technologies MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: leontev@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5798-9721, <https://orcid.org/0000-0003-3673-2468>

Dmitry V. Zhmatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mathematical Support and Standardization, Institute of Information Technologies MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zhmatov@mirea.ru. Scopus Author ID 56825948100, RSCI SPIN-code 2641-6783, <https://orcid.org/0000-0002-7192-2446>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 378.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-134-145>

EDN BYDBUX



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Формирование комплексного подхода к развитию научно-образовательной инфраструктуры современного инженерного университета

С.А. Кудж,
Н.Б. Голованова[@],
Ю.Г. Графов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: golovanova@mirea.ru

• Поступила: 05.12.2025 • Доработана: 15.12.2025 • Принята к опубликованию: 18.02.2026

Резюме

Цели. Целью статьи является разработка комплексного подхода к обоснованию решений, направленных на развитие научно-образовательной инфраструктуры инженерного университета, включающего выбор политики модернизации научно-образовательной инфраструктуры, обоснование формата объектов научно-образовательной инфраструктуры с учетом многообразия актуальных задач, вовлечение промышленных партнеров в реализацию инфраструктурной политики, а также вопросы ресурсного обеспечения, реализуемого с применением инструментов математической формализации и аналитической оценки.

Методы. В исследовании использованы методы системного и стратегического анализа, методы сравнения и формализации, методы моделирования и статистических показателей, методы управления изменениями и рисками, а также метод актуализации стратегии.

Результаты. Масштабные задачи по обеспечению вклада современных инженерных университетов в достижение технологического лидерства требуют особого внимания к вопросам развития научно-образовательной инфраструктуры. Эффективным решением является создание лабораторий особого типа – мегалабораторий, которые рассматриваются как оптимальный формат объекта научно-образовательной инфраструктуры, сочетающий учебные, исследовательские и коммуникационные зоны с их преимуществами и типологией. Обоснована значимость партнерства с промышленными партнерами как ключевого драйвера развития, обеспечивающего соответствие образовательных программ, исследований и разработок потребностям рынка. Разработана математическая модель оценки проекта создания мегалаборатории, основанная на комплексной системе показателей, позволяющая формализовать процедуру выбора и принятия решения о финансировании вновь создаваемых объектов научно-образовательной инфраструктуры.

Выводы. Определенные на государственном уровне инфраструктурные ограничения в условиях технологического развития и необходимости достижения технологического лидерства становятся для инженерных университетов ключевым вызовом, требующим формирования инструментария поиска, обоснования и принятия управленческих решений по развитию объектов научно-образовательной инфраструктуры.

Использование комплексного подхода позволяет максимально учесть актуальные требования к объектам научно-образовательной инфраструктуры, включая высокий уровень интеграции образования и науки, необходимость учета и включения в процесс развития промышленных партнеров как залог сближения образования, науки и потребностей реальной экономики. Сформулированные рекомендации и предложенные решения позволяют эффективно решать задачи, стоящие перед современными инженерными университетами в рамках программ развития.

Ключевые слова: инженерный университет, научно-образовательная инфраструктура, мегалаборатории, промышленное партнерство, оценка инфраструктурных проектов, стратегическое планирование, междисциплинарные исследования, технологическое развитие, математическая модель, система показателей эффективности

Для цитирования: Кудж С.А., Голованова Н.Б., Графов Ю.Г. Формирование комплексного подхода к развитию научно-образовательной инфраструктуры современного инженерного университета. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):134–145. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-134-145>, <https://www.elibrary.ru/BYDBUX>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Formation of a comprehensive approach to developing the scientific and educational infrastructure of a modern engineering university

Stanislav A. Kudzh,
Natalia B. Golovanova[@],
Yuri G. Grafov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: golovanova@mirea.ru

• Submitted: 05.12.2025 • Revised: 15.12.2025 • Accepted: 18.02.2026

Abstract

Objectives. The work sets out to develop a comprehensive approach to grounding decisions aimed at advancing the scientific and educational infrastructure of an engineering university. This includes selecting modernization policies for the scientific and educational infrastructure, substantiating the format of scientific and educational infrastructure objects in light of the diversity of current tasks, involving industry partners in implementing infrastructure policies, as well as addressing resource support issues using mathematical formalization and analytical evaluation tools.

Methods. Methods of systems and strategic analysis, comparison and formalization, modeling and statistical indicators, as well as change management, risk assessment, and strategy actualization approaches, were used.

Results. Ensuring the contribution of modern engineering universities to technological leadership is an ambitious task that requires a focused approach to the development of scientific and educational infrastructure. One effective solution consists in the creation of specialized laboratories, or mega-laboratories, which are considered as an optimal format for the scientific and educational infrastructure. Such laboratories combine educational, research, and communication zones, along with their respective advantages and typologies. The importance of collaboration with industry partners in driving innovation, helping to ensure that educational programs, research, and development

align with market needs, is demonstrated. A mathematical model is developed for evaluating projects associated with the establishment of a mega-laboratory based on a comprehensive system of indicators. This model was used to formalize the procedure for selecting and financing of newly created scientific and educational infrastructure.

Conclusions. Infrastructure constraints defined at the state level in the context of technological development and the need to ensure technological independence are becoming a key challenge for engineering universities. This necessitates the development of tools for seeking, justifying, and making managerial decisions. The described comprehensive approach takes into account current requirements for scientific and educational infrastructure facilities, including a high degree of integration between education and science, and the involvement of industry partners in the development process in order to bridge the gap between education, science, and the demands of the real economy. The formulated recommendations and proposed solutions effectively address the issues faced by modern engineering universities within development programs.

Keywords: engineering university, scientific and educational infrastructure, mega-laboratories, industrial partnership, infrastructure project assessment, strategic planning, interdisciplinary research, technological development, mathematical model, performance indicator system

For citation: Kudzh S.A., Golovanova N.B., Grafov Yu.G. Formation of a comprehensive approach to developing the scientific and educational infrastructure of a modern engineering university. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2): 134–145. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-134-145>, <https://www.elibrary.ru/BYDBUX>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

На стратегической сессии по развитию образования осенью 2024 года под председательством Председателя Правительства Российской Федерации М.В. Мишустина¹ Министр науки и высшего образования Российской Федерации В.Н. Фальков среди актуальных вызовов системе высшего образования и развитию инженерных университетов выделил инфраструктурные ограничения². Данный факт определяет фокус внимания руководства университетов на развитии материально-технической базы, состояние которой в значительной степени определяет способность обеспечить подготовку квалифицированных инженерных кадров для высокотехнологичной российской экономики, проведение научных исследований и разработок для достижения технологического лидерства и обеспечения технологической независимости.

Вопрос развития материально-технической базы инженерного университета в современных условиях далеко не прост. И его сложность заключается не только в поиске финансовых ресурсов, хотя это, конечно, значимый фактор, а в том, что технологическое развитие сегодня происходит столь стремительно, что университет должен не только своевременно успевать адаптироваться к происходящим изменениям, но и, что самое важное, на них реагировать. Не случайно в «Концепции технологического

развития Российской Федерации до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315р³, резкое ускорение процесса создания и распространения качественно новых технологий, в т.ч. цифровых, радикально меняющих рынки и производственные системы, было отмечено одной из ключевых угроз технологического развития. И в случае, если инженерный университет не находит эффективного решения данной проблемы, мы получаем модель «догоняющего» развития, отставание в подготовке инженерных кадров, сокращение инновационных исследований и разработок.

Создание благоприятных условий для обучения является основной задачей руководства любого университета. Под благоприятными условиями для обучения подразумевается не только поддержание зданий, сооружений и земельных участков в необходимом для проведения учебного процесса и научных исследований состоянии, осуществление соответствующих профилактических ремонтных работ систем кондиционирования и вентиляции и т.д., но и постоянная поддержка и развитие интереса обучающихся к освоению современных инновационных решений и/или программно-аппаратных комплексов, проведение передовых

¹ <http://government.ru/news/53144/>. Дата обращения 04.02.2026. / Accessed February 04, 2026. (In Russ.).

² <https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novostiministerstva/90823/>. Дата обращения 04.02.2026. / Accessed February 04, 2026. (In Russ.).

³ Концепция технологического развития на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р. <http://government.ru/docs/48570/>. Дата обращения 04.02.2026. [The Concept of Technological Development of the Russian Federation until 2030. Directive of the Government of the Russian Federation of May 20, 2023 г. No. 1315-р. <http://government.ru/docs/48570/>. Accessed February 04, 2026. (In Russ.).]

научных исследований и организация более тесного взаимодействия с передовыми компаниями Российской Федерации, в т.ч. при выпуске продукции, с внедрением новых методов контроля качества изделий. Именно мотивация обучающихся – ключ к результативному обучению, стремлению к постоянному совершенствованию и получению нового знания. И в этом отношении крайне важно, чтобы студент видел и понимал, что его, прежде всего, практические навыки формируются и развиваются с использованием новейшего оборудования, современной приборной базы.

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Модернизация материально-технической базы, в первую очередь лабораторий, является одним из ключевых направлений развития современного инженерного университета, его образовательной и научной деятельности.

Однако, несмотря на всю важность и значимость рассмотрения подходов к реализации инфраструктурной политики, вопросы формирования стратегии развития лабораторной базы и оценки предлагаемых к реализации проектов не нашли должного освещения, хотя исследование вопросов развития инженерных университетов на современном этапе, в частности проблем подготовки инженерных кадров, вызывает повышенный интерес⁴ [1–4]. Что касается именно научно-образовательной инфраструктуры, то встречаются лишь отдельные высказывания, констатирующие роль и значимость лабораторий, но не раскрывающие всю глубину и сложность вопроса создания и развития научно-образовательной инфраструктуры. Так, в статье Соболева Л.Б. утверждается, что «только сильные (и богатые) научные лаборатории при университетах способны создать базу для перехода к цифровой экономике» [5]. А в статье Шарипова Ф.Ф. подчеркивается, что учебно-научные лаборатории вузов являются одним из основных компонентов решения задач, поставленных в Стратегии научно-технологического развития [6]. Но что требуется для создания лабораторий, которые станут активными «участниками» решения задач

⁴ Аналитический доклад Лаборатории исследований рынка труда НИУ ВШЭ «Выпускники инженерных специальностей. «Сопроотивление материалов» на российском рынке труда. https://www.hse.ru/data/2025/04/15/1951597714/Report_20250415.pdf. Дата обращения 04.02.2026. [Analytical report of the HSE Labor Market Research Laboratory: “Graduates of Engineering Specialties: Resistance of Materials in the Russian Labor Market.” https://www.hse.ru/data/2025/04/15/1951597714/Report_20250415.pdf. Accessed February 04, 2026. (In Russ.)]

научно-технологического развития, какие при этом возникают проблемы, и каковы, что главное, пути их решения – все эти вопросы остаются вне рамок исследования.

Очевидно, что осуществление инфраструктурной политики допускает различные варианты ее реализации. Конкретный выбор зависит от принятой стратегии развития научно-образовательной инфраструктуры. Но не вызывает сомнения, что управлять процессом развития материально-технической базы вуза необходимо. В противном случае, «отсутствие должного внимания данной проблеме ... оказывает негативное влияние на качество образовательного процесса в целом» [7].

Стратегией РТУ МИРЭА является создание мегалабораторий как уникальных научно-образовательных комплексов. В настоящее время мегалаборатории являются ядром научно-образовательной инфраструктуры, представляя собой объекты, оборудованные в соответствии с самыми передовыми технологическими решениями и обладающие широкими возможностями использования, как в образовательной, так и научно-исследовательской деятельности.

Создание мегалаборатории – это не только определение места для выполнения лабораторных работ или рабочего места исследователя; организация закупки и установки оборудования, его расположения на выделенной площадке. Это вопрос об особом роде образовательном и научно-исследовательском пространстве, научно-образовательном комплексе, включающем учебные аудитории, зоны работы исследовательских команд, офисные помещения, коммуникационные и неформальные зоны. Мегалаборатория – это пространство с различными объектами инфраструктуры, комфортное для всех заинтересованных сторон.

Есть несколько весомых аргументов, которые объясняют акцент на создании именно мегалабораторий.

Во-первых, это создание крупных, хорошо оснащенных комплексов, ориентированных на реализацию масштабных образовательных и научно-исследовательских проектов и позволяющих удовлетворить ресурсные потребности на собственной базе.

Во-вторых, это возможность реализации междисциплинарных проектов, что стратегически значимо для развития университета в целом, реализации его программы развития, увеличения объема и повышения качества работ и услуг, выполняемых в интересах всех заинтересованных сторон.

В-третьих, это возможность заинтересовать и привлечь индустриальных партнеров, использовать механизмы финансирования расходов на проекты

по созданию и использованию мегалабораторий для учебно-научной деятельности.

В-четвертых, это наличие эффекта экономии от масштаба за счет обеспечения внедрения самого современного оборудования, передовых комплексов, технологий и программно-аппаратных решений для использования различными кафедрами институтов в учебно-научной деятельности, что обеспечивает снижение удельных затрат, а также издержек, связанных с эксплуатацией.

В-пятых, возможность претендовать на государственную поддержку в связи с реализацией проектов, имеющих региональное и национальное значение, предоставление софинансирования университету при проведении фундаментальных или прикладных научных исследований по направлениям, по которым в РТУ МИРЭА создан существенный задел. Обязательством университета при участии в конкурсах Минобрнауки России⁵, Минпромторга России⁶ и т.д. является привлечение внебюджетных источников реализации проектов.

В-шестых, обновление существующей материально-технической базы мегалабораторий, созданных ранее и показавших свою эффективность, т.к. это прекрасная база для формирования профессиональных знаний и навыков.

Наконец, ориентация на создание именно мегалабораторий рассматривается как инструмент выработки типовых решений по развитию научно-образовательной инфраструктуры, которые могут быть масштабированы и тиражированы в интересах дальнейшего развития инженерного образования и повышения эффективности научных исследований и разработок в рамках актуальной повестки научно-технологического развития страны. Поэтому все проекты по созданию мегалабораторий обеспечиваются полным комплектом методических, учебных пособий, комплектом образовательных материалов, включая видеолекции, для проведения занятий в вузах страны, где реализуются совместные со стратегическими партнерами РТУ МИРЭА программы и проекты, что безусловно важно для организаций-партнеров, стоящих перед выбором площадки для отработки

технологических и организационных решений с целью дальнейшего использования в качестве типовых решений.

Рассматривая мегалаборатории как приоритетный подход к развитию научно-образовательной инфраструктуры университета, следует отметить необходимость типологической дифференциации мегалабораторий, что важно при принятии решения о целесообразности запуска проекта развития. Здесь важно подчеркнуть, что каждый из выделяемых типов мегалабораторий не только характеризуется определенным функциональным назначением и целевой установкой, но и реализуется в рамках определенной финансовой модели.

К первому типу относятся проекты развития мегалабораторий, ориентированные на дисциплинарные области фундаментального характера. Это означает, что основным назначением мегалаборатории является ее использование в образовательной деятельности, что предполагает практически максимальную загрузку под занятиями учебного процесса. Вместе с тем такие мегалаборатории могут использоваться как площадки для фундаментальных исследований. Финансирование проектов создания мегалабораторий данного типа предполагает использование средств централизованного фонда РТУ МИРЭА.

Второй тип мегалабораторий связан с проектами развития технологий будущего. Это площадки поисковых исследований, где отрабатываются инициативные задачи, не нашедшие на данном этапе заинтересованного конечного потребителя, но результаты которых в ближайшем будущем, несомненно, будут востребованы. Такие лаборатории «можно рассматривать как своего рода полигон для проверки перспективных гипотез и поиска лидеров – будущих организаторов новых направлений»⁷. В данном случае финансовое обеспечение осуществляется путем выделения средств из централизованного фонда РТУ МИРЭА с учетом обязательств по открытию новых направлений в образовательной и научной деятельности со стороны учебно-научного или научного подразделения.

Третий тип мегалабораторий является наиболее распространенным и ориентирован на решение актуальных прикладных задач как подготовки инженерных кадров, так и проведения научных исследований и разработок, востребованных сегодня. Данный тип мегалабораторий в наибольшей степени ориентирован на междисциплинарные и мультидисциплинарные проекты

⁵ Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. <https://minobrnauki.gov.ru/>. Дата обращения 04.02.2026. [The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka). <https://minobrnauki.gov.ru/>. Accessed February 04, 2026. (In Russ.).]

⁶ Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. <https://minpromtorg.gov.ru/>. Дата обращения 04.02.2026. [The Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (Minpromtorg). <https://minpromtorg.gov.ru/>. Accessed February 04, 2026. (In Russ.).]

⁷ <https://www.rbc.ru/society/14/11/2022/63720d159a794767085e7261>. Дата обращения 04.02.2026. / Accessed February 04, 2026. (In Russ.).

в образовательной и научно-исследовательской деятельности, создание площадок опытного производства. Сегодня все чаще звучит требование, что «технические вузы должны стать производственными лабораториями перспективного развития»⁸. Создание мегалабораторий подобного типа предполагает активное взаимодействие с индустриальными партнерами.

ПАРТНЕРСТВО КАК ДРАЙВЕР УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Взаимодействие университетов с организациями и предприятиями является быстроразвивающимся трендом в современном высшем образовании [8]. Именно в рамках взаимодействия можно подготовить инженеров, компетенции которых максимально соответствуют потребностям работодателей, выстроить исследования и разработки по продуктовым и технологическим решениям, в наибольшей степени соответствующим достигнутому технико-технологическому уровню предприятия и задачам его технико-технологического развития.

Вопрос взаимодействия вузов с индустриальными партнерами далеко не нов [9]. Но, как отмечают авторы одной из публикаций, «в отечественных вузах реализуются достаточно традиционные и распространенные технологии и способы взаимодействия с компаниями», а «масштабность и результативность такого взаимодействия в большинстве случаев ограничены отсутствием системного подхода» [10].

Очевидно, что активное взаимодействие может возникать тогда и в тех областях, где сферы интересов и компетенций университета и предприятия пересекаются и обеспечивают непрерывную научно-производственную цепочку «от идеи до воплощения» в конкретном продукте. Это значит, что партнерство инженерного университета с бизнес-структурами должно иметь характер не однократной акции или разового мероприятия, а выстраиваться на долговременной основе, становясь драйвером развития университета. При этом драйвер роста и развития возникает только при условии, что в результате взаимодействия удовлетворяются интересы каждой из сторон, и взаимная ценность становится своеобразным «стратегическим фильтром», позволяющим принимать обоснованные управленческие решения, обеспечивающие получение выгоды каждой из них.

Наиболее динамично процесс взаимодействия университетов с индустриальными партнерами развивается у вузов-участников программы «Приоритет 2030». Как отметил заместитель Председателя Правительства Российской Федерации Д.Н. Чернышенко, вузы «выстраивают и укрепляют партнерские отношения с предприятиями реального сектора. За 2.5 года в рамках программы создано более 420 консорциумов, объединивших университеты, научные организации и бизнес. Заключено свыше 6 тыс. договоров с индустриальными партнерами на сумму более 62 млрд рублей»⁹.

В условиях активного развития взаимодействия вузов и индустриальных партнеров стратегически оправданным решением становится привлечение индустриального партнера к развитию научно-образовательной инфраструктуры университета. Участие партнера является принципиально важным как минимум в силу двух обстоятельств. Во-первых, необходимо выработать общую концепцию нового научно-образовательного пространства, создание которого обеспечит необходимые материально-технические условия для решения поставленных задач с учетом интересов всех сторон. Во-вторых, даже для такого крупного инженерного университета как РТУ МИРЭА создание каждой мегалаборатории является высокочрезвычайно затратным проектом, требующим привлечения больших объемов финансовых ресурсов.

Финансовая политика современного университета характеризуется развитием процессов диверсификации источников финансирования деятельности, в т.ч. за счет привлечения инвестиций предприятий-работодателей и других заинтересованных сторон [11]. Диверсификация финансовых ресурсов формируется на основе привлечения субъектов-участников к осуществлению инновационной деятельности путем внедрения результатов научно-исследовательских работ (НИР) и научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в деятельность действующих и создание новых предприятий, а также вовлечение партнеров в проведение исследований и конструкторских разработок, что коррелирует с таким важным преимуществом как расширение возможностей осуществления научных исследований и разработок.

В большинстве случаев возможность взаимодействия и привлечения индустриального партнера реализуется в проектах третьего типа мегалабораторий, которые являются наиболее масштабными и ориентированы на междисциплинарные и мультидисциплинарные разработки.

⁸ <https://rectorspeaking.ru/tekhnicheskie-vuzy-dolzheny-stat>. Дата обращения 04.02.2026. / Accessed February 04, 2026. (In Russ.).

⁹ <https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/90675/>. Дата обращения 04.02.2026. / Accessed February 04, 2026. (In Russ.).

Финансовая модель такого проекта предполагает софинансирование со стороны индустриального партнера, приобретающего статус стратегического партнера университета, и возможное тиражирование предлагаемых решений в вузах страны, в т.ч. для продуктовой реализации исследовательской и проектной деятельности в режиме сетевого взаимодействия, реализации сетевых образовательных проектов и программ, включая программы дополнительного образования.

Развитие этих процессов подкреплено рядом изменений в высшей школе – переходом образовательных организаций в автономные, что должно способствовать развитию самостоятельности учреждений образования, формированию системы финансирования, соответствующей современным экономическим условиям, развитию системы эндowment-фондов. Но для реализации подобного привлечения финансирования необходима отлаженная система взаимодействия и последующего сотрудничества и партнерства с предприятиями и организациями.

ОЦЕНКА ПРОЕКТОВ РАЗВИТИЯ МЕГАЛАБОРАТОРИЙ, ФИНАНСИРУЕМЫХ ИЗ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ФОНДА

Основным источником финансирования проектов развития мегалабораторий в РТУ МИРЭА являются средства централизованного фонда, значимой составляющей которого являются средства от приносящей доход деятельности. Сегодня это важный финансовый ресурс, который позволяет решать задачи развития университета, в т.ч. в части ее научно-образовательной инфраструктуры [12].

Учитывая возрастающую потребность в модернизации материально-технической базы и необходимость развития новых направлений научно-образовательной деятельности, крайне важным становится вопрос обоснования принимаемого решения о финансировании, которое осуществляется на основе принятого критерия. Поскольку решение вопроса о выборе проекта развития научно-образовательной инфраструктуры является управленческим решением, то, очевидно, что выбираемый критерий должен быть непосредственно связан с деятельностью университета и направлен на то, чтобы достичь стратегических целей развития [13]. Главным критерием принятия такого решения должна быть максимизация ценности реализуемого проекта для университета в условиях ограниченности ресурсов. Важным при этом представляется обеспечение информационной открытости конкурсных процедур, что способствует повышению доверия работников к принимаемым руководством решениям и в конечном

счете – повышению эффективности и результативности деятельности.

Очевидно, что с учетом ограниченности финансовых возможностей образовательных организаций необходима разработка понятной (открытой) системы отбора предлагаемых к реализации проектов развития лабораторий, которая станет для руководства вуза надежным и эффективным инструментом решения задач развития научно-образовательной инфраструктуры [14].

Разработка системы отбора проектов мегалабораторий, создание и функционирование которых будет поддерживаться университетом, определила следующие задачи исследования: формирование системы показателей, обеспечивающих комплексную оценку предлагаемого проекта; выбор и обоснование подхода к построению интегральной оценки проекта; установление шкалы оценивания как основы принятия решения о поддержке проекта.

Основным критерием отбора проекта является ожидаемая ценность мегалаборатории, ее полезность для решения задач развития основных направлений деятельности. С учетом установленного критерия была сформирована система показателей, характеризующих основные аспекты будущей мегалаборатории. Эта система включает пять групп показателей, каждая из которых декомпозируется на частные показатели соответствующей направленности (табл. 1):

- образовательная деятельность;
- научные исследования и разработки;
- взаимодействие с индустриальными партнерами;
- актуальность и значимость проекта;
- уникальность проекта.

Как следует из представленного перечня показателей, каждый проект оценивается с точки зрения его ценности для дальнейшего развития двух основных видов деятельности: образовательной и научно-исследовательской, а также оценивается вовлеченность в проект индустриальных партнеров как индикатор ценности предлагаемого проекта для реальной экономики. Помимо трех указанных составляющих в предлагаемую систему показателей включены имиджевые характеристики, которые дополняют восприятие проекта.

Логическая формула каждого показателя, кроме показателей, входящих в пятую группу, построена по принципу относительной величины в форме индекса (табл. 2), что в последующем обеспечивает сопоставимость всех разнородных показателей и полученных результатов и возможность их агрегирования в сводный показатель, несмотря на многомерность исходной информации [15].

Таблица 1. Комплексная система показателей оценки проекта создания мегалаборатории

№	Группы показателей	Показатели
1	Образовательная деятельность	1.1. Планируемая загрузка мегалаборатории учебными занятиями. 1.2. Планируемый охват обучающихся занятиями в мегалаборатории. 1.3. Ожидаемая включенность учебно-научных подразделений в использование мегалаборатории для учебных целей
2	Научные исследования и разработки	2.1. Доходность научно-исследовательских проектов, выполняемых в мегалаборатории. 2.2. Публикационная активность по направленности мегалаборатории. 2.3. Вклад результатов НИОКР, выполненных в мегалаборатории, в результаты научно-исследовательской деятельности университета. 2.4. Эффективность использования человеческих ресурсов. 2.5. Привлечение молодых ученых к выполнению НИОКР
3	Взаимодействие с индустриальными партнерами	3.1. Участие индустриального партнера в софинансировании создания мегалаборатории. 3.2. Использование индустриальным партнером механизма целевого обучения для подготовки кадров. 3.3. Трудоустройство выпускников университета на предприятия и организации индустриального партнера
4	Актуальность и значимость проекта	4.1. Соответствие тематики научно-образовательных проектов и направлений деятельности мегалаборатории направлениям национальных проектов технологического лидерства (НПТЛ). 4.2. Интегрированность основных направлений деятельности мегалабораторий в достижение стратегических целей РТУ МИРЭА
5	Уникальность проекта	5.1. Отсутствие аналогов. Принципиально новая мегалаборатория. 5.2. Уникальность отдельных составляющих мегалаборатории. 5.3. Модернизация действующей мегалаборатории

Таблица 2. Система индексов для оценки проектов развития научно-образовательной инфраструктуры

1	Образовательная деятельность $I_{од} = \frac{I_3 + I_{ох} + I_{вкл}}{3}$ – индекс использования мегалаборатории в образовательной деятельности
1.1	I_3 – индекс планируемой загрузки мегалаборатории. $I_3 = \frac{ОАЗ}{МЗ}$, где ОАЗ – объем аудиторных занятий, планируемых (предусмотренных) для проведения лабораторных работ/практических занятий в мегалаборатории за учебный год, ч.; МЗ – максимально возможная загруженность мегалаборатории, ч.
1.2	$I_{ох}$ – индекс планируемого охвата обучающихся. $I_{ох} = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_i}{C_{общ}}$, где C_i – планируемое число студентов (физических лиц) учебных подразделений, занимающихся в мегалаборатории за учебный год, чел.; $C_{общ}$ – общая численность обучающихся в университете на момент подачи заявки, чел.
1.3	$I_{вкл}$ – индекс ожидаемой включенности учебно-научных подразделений. $I_{вкл} = \frac{N}{M}$, где N – число учебно-научных подразделений, студенты которых планируют заниматься в мегалаборатории, ед.; M – общее число учебно-научных подразделений университета, ед.
2	Научно-исследовательская деятельность $I_{н} = \frac{I_{дох} + I_{чр} + I_{му} + I_{вкл} + I_{па}}{5}$ – индекс использования мегалаборатории для развития научных исследований и разработок
2.1	$I_{дох}$ – индекс доходности научно-исследовательских проектов, выполняемых в мегалаборатории. $I_{дох} = \frac{(D_{ож} + D_{тем} + D_{тек}) - (З_{ож} + З_{тем} + З_{тек})}{D_{ож} + D_{тем} + D_{тек}}$, где $D_{ож}$ – ожидаемый доход по научно-исследовательским проектам, которые планируются к выполнению в создаваемой мегалаборатории, млн руб.; $D_{тем}$ – доход, полученный университетом от завершенных контрактов (этапов) по научно-исследовательским проектам соответствующей профильной направленности за последние 3 года, млн руб.; $D_{тек}$ – ожидаемый доход по научно-исследовательским проектам от действующих контрактов (этапов) соответствующей профильной направленности, млн руб.;

Таблица 2. Продолжение

2.1	<p>$Z_{ож}$ – ожидаемые затраты (без учета отчислений в централизованный фонд университета) по научно-исследовательским проектам, которые планируются к выполнению в создаваемой мегалаборатории, млн руб.; $Z_{тем}$ – затраты (без учета отчислений в централизованный фонд университета) по завершённым контрактам (этапам) по научно-исследовательским проектам соответствующей профильной направленности за последние 3 года, млн руб.; $Z_{тек}$ – ожидаемые затраты (без учета отчислений в централизованный фонд университета) по научно-исследовательским проектам от действующих контрактов (этапов) соответствующей профильной направленности, млн руб.</p>
2.2	<p>$I_{чр}$ – индекс использования человеческих ресурсов. $I_{чр} = \frac{C_{факт}}{C_{пр}}$ где $C_{пр}$ – количество ставок, выделенных на выполнение проектов НИОКР, ед.; $C_{факт}$ – количество работников, занимаемых полную ставку в выполнении НИОКР, чел.</p>
2.3	<p>$I_{му}$ – индекс привлечения молодых ученых к выполнению НИОКР. $I_{му} = \frac{П_{му}}{П_{факт}}$ где $П_{му}$ – численность молодых работников без ученой степени до 30 лет, имеющих ученую степень кандидата наук до 35 лет или доктора наук до 40 лет, привлеченных к выполнению НИОКР, чел.; $П_{факт}$ – численность работников, фактически занятых в выполнении НИОКР, чел.</p>
2.4	<p>$I_{вкл}$ – индекс вклада результатов НИОКР, выполненных в мегалаборатории результаты научно-исследовательской деятельности университета. $I_{вкл} = \frac{C_{пнн}}{C_{общ}}$ где $C_{пнн}$ – стоимость выполняемых проектов профильной направленности, за последние 3 года (акты выполненных работ), млн руб.; $C_{общ}$ – общая стоимость выполненных в университете проектов НИР за последние 3 года (акты выполненных работ), млн руб.</p>
2.5	<p>$I_{па}$ – индекс публикационной активности по направленности мегалаборатории. $I_{па} = \frac{П_{тп}}{П_{общ}}$ где $П_{тп}$ – число публикаций по тематике направленности мегалаборатории за год, предшествующий заявке на проект, ед.; $П_{общ}$ – общее число публикаций университета за год, предшествующий заявке на проект, ед.</p>
3	<p>Взаимодействие с промышленными партнерами $I_{взм} = \frac{I_{соф} + I_{ц} + I_{тр}}{3}$ – индекс вовлеченности в проект мегалаборатории промышленного партнера</p>
3.1	<p>$I_{соф}$ – индекс участия промышленного партнера в софинансировании создания мегалаборатории. $I_{соф} = \frac{O_{соф}}{O_{общ}}$ где $O_{соф}$ – объем средств, планируемых к выделению промышленным партнером на реализацию проекта, млн руб.; $O_{общ}$ – общая стоимость реализации проекта, млн руб.</p>
3.2	<p>$I_{ц}$ – индекс использования промышленным партнером механизма целевого обучения для подготовки кадров. $I_{ц} = \frac{C_{ц}}{O_{ц.общ}}$ где $C_{ц}$ – численность целевых студентов от промышленного партнера, чел.; $O_{ц.общ}$ – общая численность обучающихся по целевому обучению, чел.</p>
3.3	<p>$I_{тр}$ – индекс трудоустройства выпускников университета на предприятия и организации промышленного партнера. $I_{тр} = \frac{В_{трип}}{В_{три}} = \frac{В_{трип}}{28}$ где $В_{трип}$ – численность выпускников университета, трудоустроившихся в организации промышленного партнера за последние 4 года, чел.; $В_{три}$ – целевое значение числа трудоустроенных выпускников в организации промышленного партнера за 4 последних года, исходя из годового целевого значения, составляющего не менее 70% от выпуска данного года по целевому приему в интересах данного промышленного партнера, чел.</p>
4	<p>Актуальность и значимость предлагаемого проекта для решения стратегических задач развития университета $I_{ак} = \frac{I_{НПТЛ} + I_{сир}}{2}$ – индекс актуальности и значимости проекта для развития университета</p>
4.1	<p>$I_{НПТЛ}$ – индекс соответствия тематики научно-образовательных проектов и направлений деятельности мегалаборатории направлениям НПТЛ. $I_{НПТЛ} = \frac{НПТЛ_{пр}}{НПТЛ}$ где $НПТЛ_{пр}$ – число НПТЛ, в решении задач которых будут задействованы работы, планируемые к выполнению в мегалаборатории, ед.; $НПТЛ$ – общее число НПТЛ, реализуемых на данный момент, ед.</p>

Таблица 2. Продолжение

4.2	$I_{сцр}$ – индекс интегрированности основных направлений деятельности мегалабораторий в достижение стратегических целей РТУ МИРЭА, предусмотренных программой «Приоритет 2030». $I_{сцр} = \frac{СИ_{пр}}{СИ}$, где $СИ_{пр}$ – число стратегических инициатив программы «Приоритет 2030», в реализации которых будут задействованы работы, планируемые к выполнению в мегалаборатории, ед.; $СИ$ – общее число стратегических инициатив, предусмотренных программой «Приоритет 2030», ед.
5	Уникальность проекта мегалаборатории $I_y = \frac{А/Ф/ОЛ}{5}$ – индекс уникальности проекта
5.1	А – отсутствие аналогов на территории Российской Федерации, создание принципиально новой лаборатории (5 баллов)
5.2	Ф – наличие отдельных фрагментов лаборатории в других организациях (2 балла)
5.3	ОЛ – обновление существующих комплексов мегалаборатории (1 балл)

В результате, имеем пять сводных индексов, которые входят в индекс интегральной оценки проекта по созданию мегалаборатории:

- $I_{од}$ – индекс использования мегалаборатории в образовательной деятельности;
- $I_{н}$ – индекс использования мегалаборатории для развития научных исследований и разработок;
- $I_{взм}$ – индекс вовлеченности в проект мегалаборатории индустриального партнера;
- $I_{ак}$ – индекс актуальности и значимости проекта для развития университета;
- I_y – индекс уникальности проекта.

Каждый индекс I_i может принимать значения в интервале от 0 до 1, при этом 1 означает максимально возможный результат оценки и, соответственно, максимально возможную полезность и ценность мегалаборатории.

С целью обеспечения возможности защиты представляемого проекта, а также уточнения возникающих в ходе рассмотрения проекта вопросов в качестве самостоятельной в интегральную оценку включается оценка презентации проекта (ПП), которая в целях обеспечения сопоставимости с другими оценками, представленными в индексной форме, имеет бинарный характер, принимая одно из двух возможных значений – 0/1.

Таким образом, интегральная оценка представленного на рассмотрение проекта (ИОП) мегалаборатории выглядит следующим образом:

$$ИОП = F(I_{од}, I_{н}, I_{взм}, I_{ак}, I_y, ПП).$$

Используя существующую практику получения интегральной оценки в форме интегрального индекса, получаем следующую математическую формализацию:

$$ИОП = K_1 \frac{I_{од} + I_{н} + I_{взм}}{3} + K_2 \frac{I_{ак} + I_y}{2} + K_3 ПП,$$

где K_i – весовые коэффициенты каждой составляющей интегральной оценки проекта.

Учитывая, что K_1 является весовым коэффициентом для показателей, непосредственно связанных и отражающих стратегически значимые направления деятельности, первые три индекса входят в интегральную оценку с коэффициентом значимости 3. Две другие составляющие интегральной оценки входят с весовым коэффициентом 1. В итоге, мы получаем следующую модель интегральной оценки:

$$ИОП = 3 \cdot \frac{I_{од} + I_{н} + I_{взм}}{3} + \frac{I_{ак} + I_y}{2} + ПП.$$

Максимально возможное значение интегральной оценки ценности проекта мегалаборатории составляет 5 баллов. Для того, чтобы оценить уровень представленного проекта необходимо сравнить фактически полученное значение оценки с максимально возможным:

$$\gamma = \frac{ИОП_{факт}}{5},$$

которое показывает степень близости фактического значения оценки проекта к максимально возможному – 5. В итоге основанием для принятия решения являются следующие соотношения:

- $0.7 \leq \gamma \leq 1.0$ – проект принимается к реализации;
- $0.4 \leq \gamma < 0.7$ – «серая зона», проект предлагается доработать, прежде всего, за счет усиления интеграции в решение стратегически значимых для университета задач;
- $0 \leq \gamma < 0.4$ – проект отклоняется.

Основным преимуществом предлагаемого подхода является его комплексность и объективность, что позволяет считать полученную интегральную оценку рассматриваемого проекта адекватной и обеспечивающей надежную информационную основу для принятия решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамичное, устойчивое и полезное для общества развитие инженерных университетов во многом зависит от того, насколько эффективно будет решаться задача модернизации их материально-технической базы. Но, как показывает практика, это требует не только финансовых вложений, но и продуманной инфраструктурной политики, стратегического планирования развития объектов научно-образовательной инфраструктуры, что позволит принимать решения, обеспечивающие устойчивое функционирование образовательной организации в современных условиях, ее долгосрочное развитие и достижение целей, определенных программой развития.

Широкий комплекс решаемых сегодня инженерными университетами задач, а также высокая затратность создания и развития большинства объектов научно-образовательной инфраструктуры,

требуют четкого, формализованного подхода к отбору предлагаемых учебно-научными и научными структурными подразделениями проектов развития материально-технической базы инженерных университетов, обеспечивающего максимальную объективность оценки. Предложенный в настоящем исследовании подход к решению задачи отбора проектов отличается системностью и комплексностью, что при реализации проекта будет способствовать поиску и выработке продуктивных решений в рамках основных направлений деятельности университета, в первую очередь, в части реализации взаимосвязанных проектов в инновационной, образовательной и научной сферах.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оплетина Н.В. Инженерное образование в контексте новой технологической парадигмы общественного развития. *Наукоедческие исследования*. 2022;2:55–70. <https://www.elibrary.ru/uizigx>
2. Жмудь В.А. Современные проблемы высшего технического образования. *Автоматика и программная инженерия*. 2021;2(36):20–47. <https://www.elibrary.ru/cqymug>
3. Кирюшина Н.А. Современное инженерное образование: проблемы и перспективы. *Инновационное развитие профессионального образования*. 2024;3(43):70–77. <https://www.elibrary.ru/jeqswg>
4. Прохоров В.А. Проблемы системы непрерывного инженерного образования. *Непрерывное образование: XXI век*. 2019;4(28). <http://dx.doi.org/10.15393/j5.art.2019.5156>
5. Соболев Л.Б. Проблемы инженерного образования в современной России. *Экономический анализ: теория и практика*. 2017;17(7):1252–1267. <https://doi.org/10.24891/ea.17.7.1252>
6. Шарипов Ф.Ф. Управление учебно-научной лабораторией: новые требования и компетенции. *E-Management*. 2020;3(1):36–42. <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2020-1-36-42>
7. Гирюк И.А., Варкулович Т.В. К вопросу о необходимости совершенствования сферы информационного и материально-технического обеспечения системы высшего образования в Российской Федерации. *Молодой ученый*. 2023;10(457):138–142. <https://elibrary.ru/adkoqo>
8. *Взаимодействие вузов с индустриальными партнерами*. Выпуск 10. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова; 2022, 132 с.
9. Штыхно Д.А., Петров А.М. Взаимодействие вузов с индустриальными партнерами. *Научные труды Вольного экономического общества России (Научные труды ВЭО России)*. 2023;243(5):85–97. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2023-243-5-85-97>
10. Бойко Е.А., Пиколова А.А. Стратегическое взаимодействие вуза с индустриальными партнерами. *Профессиональное образование в России и за рубежом*. 2022;4(48):51–58. https://doi.org/10.54509/22203036_2022_4_51
11. Скворцов Н.И., Павлов Н.С., Ермилов В.Г. Особенности реализации финансовой политики в сфере высшего образования. *Вестник МГПУ. Серия Экономика*. 2023;1(35):37–51. <https://doi.org/10.25688/2312-6647.2023.35.1.03>
12. Меликсетян С.Н., Отришко М.О. Развитие внебюджетных источников функционирования высших учебных заведений. *Финансовые исследования*. 2020;3(68):92–97. <https://elibrary.ru/tszgmr>
13. Кашарная Г.Б., Найденова Л.И. *Принятие управленческих решений*. Пенза: Изд-во ПГУ; 2020, 68 с.
14. Конова Т.А., Нестеров В.Л. Оценка эффективности использования материально-технической базы вузов в системе показателей качества подготовки специалистов. *Фундаментальные исследования*. 2015;3:187–191. <https://elibrary.ru/tniqxf>
15. Шкуропат А.В. Интегральные индексы как инструмент управления региональным развитием. *Российский внешнеэкономический вестник*. 2021;6:58–69. <https://elibrary.ru/rkroth>

REFERENCES

1. Opletina N.V. Engineering Education in the Context of a New Technological Paradigm of Social Development. *Naukovedcheskie issledovaniya = Science Studies*. 2022;2:55–70 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/uizigx>

2. Zhmud V.A. Modern Problems of Higher Technical Education. *Avtomatika i programnaya inzheneriya = Automation and Software Engineering*. 2021;2(36):20–47 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/cqymyg>
3. Kiryushina N.A. Modern Engineering Education: Problems and Prospects. *Innovatsionnoe razvitie professional'nogo obrazovaniya = Innovative Development of Vocational Education*. 2024;3(43):70–77 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/jeqcwg>
4. Prokhorov V.A. Problems of lifelong learning in the field of engineering. *Nepreryvnoe obrazovanie: XXI vek = Lifelong Education: The 21st Century*. 2019;4(28) (in Russ.). <http://doi.org/10.15393/j5.art.2019.5156>
5. Sobolev L.B. Problems of engineering education in Russia. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*. 2017;17(7):1252–1267 (in Russ.). <https://doi.org/10.24891/ea.17.7.1252>
6. Sharipov F.F. Management of educational and scientific laboratory: new requirements and competences. *E-Management*. 2020;3(1):36–42 (in Russ.). <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2020-1-36-42>
7. Giryuk I.A., Varkulevich T.V. On the Issue of the Need to Improve the Sphere of Information and Logistics Support for the System of Higher Education in the Russian Federation. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2023;10(457):138–142 (in Russ.). <https://elibrary.ru/adkoqo>
8. *Vzaimodeistvie vuzov s industrial'nymi partnerami (Interaction between Higher Education Universities and their Partners)*. V. 10. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2022, 132 p. (In Russ.).
9. Shtykhno D.A., Petrov A.M. Interaction between Higher Education Universities and their Partners. *Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii (Nauchnye trudy VEO Rossii) = VEO of Russia Today*. 2023;243(5):85–97 (in Russ.). <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2023-243-5-85-97>
10. Boyko E.A., Pikolova A.A. Strategic Interaction of University with Industrial Partners. *Professional'noe obrazovanie v Rossii i za rubezhom = Professional Education in Russia and Abroad*. 2022;4(48):51–58 (in Russ.). https://doi.org/10.54509/22203036_2022_4_51
11. Skvortsov N.I., Pavlov N.S., Ermilov V.G. Features of Implementation of Financial Policy in the Field of Higher Education. *Vestnik MGPU. Seriya Ekonomika = MCU Journal of Economic Studies*. 2023;1(35):37–51 (in Russ.). <https://doi.org/10.25688/2312-6647.2023.35.1.03>
12. Meliksetyan S.N., Otrishko M.O. Development of Extra budgetary Sources for the Financing for Higher Education Institutions. *Finansovye issledovaniya = Financial Research*. 2020;3(68):92–97 (in Russ.). <https://elibrary.ru/tszgmr>
13. Kasharnaya G.B., Naidenova L.I. *Prinyatie upravlencheskikh reshenii (Management Decision-Making)*. Penza: PSU Publ.; 2020, 68 p. (In Russ.).
14. Konova T.A., Nesterov V.L. Estimation of the efficiency of use of material-technical base of universities in the system of indicators of the quality of training. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2015;3:187–191 (in Russ.). <https://elibrary.ru/tniqxf>
15. Shkuropat A.V. Composite Indices as a Tool for Regional Development Policy. *Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik = Russian Foreign Economic Bulletin*. 2021;6:58–69 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rkrotb>

Об авторах

Кудж Станислав Алексеевич, д.т.н., профессор, ректор, профессор кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kudzh@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, SPIN-код РИНЦ 8173-1572, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Голованова Наталия Борисовна, д.э.н., профессор, заместитель первого проректора, профессор кафедры экономики, Институт технологий управления, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, SPIN-код РИНЦ 7197-9948, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Графов Юрий Германович, к.э.н., проректор (цифровая трансформация, экономические и финансовые вопросы), ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: grafov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5584-6010

About the Authors

Stanislav A. Kudzh, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Professor, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kudzh@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, RSCI SPIN-code 8173-1572, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Natalia B. Golovanova, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy First Vice-Rector, Professor, Department of Economics, Institute of Management Technologies, MIREA – Russian Technological University, (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, RSCI SPIN-code 7197-9948, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Yuri G. Grafov, Cand. Sci. (Econ.), Vice Rector (Digital Transformation and Finance), MIREA – Russian Technological University, (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: grafov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5584-6010

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.
Подписано в печать 30.03.2026 г.
Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.
Уч.-изд. листов 18.25.
Тираж 50 экз. Заказ № 3932.

Подписку на печатную версию
Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.
Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.
Signed to print March 30, 2026.
Format 60 × 90/8. Digital print.
C.p.l. 18.25.
50 copies. Order No. 3932.

Subscription to the *Russian Technological Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.
Subscription index: **79641**.

